

HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

HOVEDPROSJEKT

Tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklagshøyde



Nichlas Lyche
Ruben Dobler Strand

Kandidatnummer: 11
Kandidatnummer: 19

08.05.2015

BACHELOROPPGAVE

Studentenes navn: Nichlas Lyche 134768
Ruben Dobler Strand 133989

Linje & studieretning Brann, sikkerhetsingeniør

Oppgavens tittel: *Tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklags-
høyde*

Oppgavetekst:

I dagens forskrift om tekniske krav til byggverk, Byggteknisk forskrift av 2010, er det fremsatt funksjonskrav knyttet til rømningstid og forhold. Funksjonskravene fra forskrift kan oppfylles ved å følge veiledningen til teknisk forskrift, VTEK 10, eller ved analytisk dimensjonering. Ved verifikasjon av oppfylte funksjonskrav vil det være behov for å vite om forholdet mellom tilgjengelig og nødvendig rømningstid fra byggverk eller deler av byggverk.

I denne oppgaven skal det sees på tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklagshøyde. Hovedformålet med oppgaven er å estimere tilgjengelig rømningstid i forsamlingslokaler av ulik størrelse. Tilgjengelig tid skal estimeres ved å bruke anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde samt datamodeller for å beregne røykfylling i rom. Tilgjengelig tid vil i oppgaven bli beregnet ved bruk av en to-sone modell (ARGOS). For noen utvalgte case vil det også bli gjort sammenligninger med en mer avansert datamodell (FDS) for å se om estimatet på tilgjengelig tid varierer ved bruk av forskjellige dataverktøy.

Som en del av det endelige resultatet skal det utarbeides et brukervennlig verktøy som gir umiddelbare estimat på tilgjengelig tid i forbindelse med prosjektering og byggemøter.

Endelig oppgave gitt: Fredag 24. april 2015
Innleveringsfrist: Fredag 8.mai 2015 kl. 12.00

Intern veileder 1 Bjarne Christian Hagen
Intern veileder 2 David Rene Ursin Johansen

**Godkjent av
studieansvarlig:**
Dato:

B. Fulla
30/4 - 15



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Høgskolen Stord/Haugesund
Studie for ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel:

Rapportnummer:

**Tilgjengelig rømningstid som funksjon av
røyklagshøyde**

Utført av Ruben Dobler Strand, Nichlas Lyche		
Linje Sikkerhet, Brannteknikk		Studieretning Ingeniør
Gradering Åpen	Innlevert dato	Veiledere: Bjarne Christian Hagen David Rene Ursin Johansen

Ekstrakt:

Denne oppgaven handler om estimering av tilgjengelig rømningstid, kun basert på røyklagshøyden. Oppgaven skal finne tid til kritisk røyklagshøyde i en to-sone modell basert på anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde, samt sammenligne resultat med mer avanserte CFD program. Som en del av oppgaven skal det utarbeides et enkelt verktøy til estimering av tilgjengelig rømningstid som kan brukes i design av bygg.

Forord

Denne oppgaven representerer avslutningen på vårt bachelorstudium i Brannsikkerhet ved Høgskolen Stord/Haugesund. Oppgaven utgjør 15 poeng, samt en 5 poengs produkt-del, og er utført våren 2015.

Valget av oppgave falt på ønsket om å gå dypere inn brann-dynamikken. Arbeidet med denne oppgaven har vært engasjerende og lærerikt. Oppgaven har gitt oss ny og spennende kunnskap, og har samtidig gitt oss utfordringer og drivkraften for å løse disse, noe vi kan ta med oss videre i karrieren.

Vi må rette en stor takk til våre to veiledere David Rene Ursin Johansen og Bjarne Christian Hagen for ypperlig veiledning, og gode innspill og ideer til vår oppgave. En takk rettes også til Bjarne Paulsen Husted for hjelp i forbindelse med simuleringsprogrammer.

Haugesund 2015

Nichlas Lyche
Ruben Dobler Strand

Innhold

Figurliste	v
Tabelliste.....	vi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Begrensinger	2
2 Teori	3
2.1 Sikker rømning.....	3
2.2 Brann i rom	3
2.2.1 Fasene i en brann.....	3
2.2.2 Varmetransport.....	4
2.2.3 Dannelse av røyklag	5
2.2.4 Design brann og vekstfaktor	6
2.3 Røyk og tålegrenser.....	8
2.3.1 Effekt av eksponering av røyk	8
2.3.2 Kritiske forhold og akseptkriterier	10
2.4 Generelt om bevaringsligninger	11
2.5 Turbulens	13
2.6 Røyksøyle	14
3 Brann- modellering og simulering	16
3.1 To-sone modeller.....	16
3.2 Computational Fluid Dynamics	16
3.3 Argos	18
3.4 Fire Dynamics Simulator(FDS)	19
4 Simuleringsdata og Resultat	21
4.1 Inngangsdata	21
4.2 Gridavhengighet	23
5 Resultat	25
5.1 Argos	25
5.2 Argos og FDS.....	27
6 Diskusjon	30
6.1 Resultat	30
6.2 To-sone og Argos.....	31
6.2.1 Temperaturkriteriet og dannelse av røyklag	31
6.3 Masseproduksjon og røyklagshøyde	32

6.3.1	Argos og gyldighetsområde	33
6.4	Avanserte modeller og sammenligning	33
6.5	Sammenligning	34
6.6	Røyklagshøyde	36
7	Konklusjon	37
8	Videre arbeid	38
9	Kildeliste	39
	Vedlegg A - Sensitivitetsanalyse	I
	Vedlegg B - Gridavhengighetstest	V
	Vedlegg C - FDS input fil	VI

Figurliste

Figur 1	- Tilgjengelig rømningstid	3
Figur 2	- Fasene i en brann uttrykt ved temperatur	4
Figur 3	- Orientering av materiale.	5
Figur 4	- Dannelse av røyklag.	6
Figur 5	- Røykfylling av rom.	6
Figur 6	- Branneffekt i en designbrann	7
Figur 7	- Strømninger gjennom et kontrollvolum	12
Figur 8	- McCaffreys inndeling av røyksøylen	13
Figur 9	- Temperatur, hastighet og massestrømmen som funksjon av høyde i røyksøylen	14
Figur 10	- Gaussisk-profil og Heskestads virtuelleorigo.	15
Figur 11	- Inndeling av rom for to-sone- og CFD program.	16
Figur 12	- DNS, LES og RANS	17
Figur 13	- Temperaturkriteriet	19
Figur 14	- Utdrag fra gridavhengighetsanalysen, 0,5 MW	24
Figur 15	- Tid til kritisk røyklagshøyde, 0,5 MW	25
Figur 16	- Tid til kritisk røyklagshøyde, 2,5 MW	26
Figur 17	- Tid til kritisk røyklagshøyde, 7 MW	27
Figur 18	- Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 0,5 MW	28
Figur 19	- Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 2,5 MW	28
Figur 20	- Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 7 MW	29
Figur 21	- Estimeringsverktøy basert på resultat.	30
Figur 22	- Stigningen til kurven før og etter maksimal energifrigjøring	32
Figur 23	- Energifrigjøring per areal og masseproduksjonen.	35
Figur 24	- Vekstfaktorer	I
Figur 25	- Dørhøyder	II
Figur 26	- Døråpninger	II
Figur 27	- Max distance	III
Figur 28	- Branneffekt	III
Figur 29	- Takhøyder	IV
Figur 30	- Gridavhengighetsanalysen, 2,5 MW	V
Figur 31	- Gridavhengighetsanalysen, 7 MW.	V

Tabelliste

Tabell 1 - Vekstrater gitt for forskjellig virksamheter	7
Tabell 2 - Maksimal energifrigjøring relatert til brensel og virksomhet	8
Tabell 3 - Menneskelig reaksjoner på eksponering av temperaturer	9
Tabell 4 - Effekten av optisk tetthet i røyklaget på sikt og ganghastighet	10
Tabell 5 - Toksiske tålegrenser	10
Tabell 6 - Akseptkriterier for sikker rømning	11
Tabell 7 - Fordeler og ulemper ved to-sone og CFD programmer.....	18
Tabell 8 - Variabler simuleringene bygger på	21
Tabell 9 – Det dimensjonsløse forholdet D^*/dx	24

Sammendrag

Hovedformålet med oppgaven var å estimere tilgjengelig rømningstid i forsamlingslokaler av ulike størrelser. Tilgjengelig tid skulle estimeres ved å benytte to-sone modellen Argos og anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde. For å simulere ulike brannsituasjoner ble det endret på variabler som gulvareal, romhøyde, åpninger og branneffekt. For noen utvalgte situasjoner ble det også gjort sammenligninger mot en mer avansert datamodell, FDS, for å se om estimatet på tilgjengelig rømningstid ville variere.

Fra tidligere arbeid var det kjent at røyklagshøyden var det minst sensitive kriteriet av akseptkriteriene for kritiske forhold og at andre kriterier som temperatur, toksisitet, stråling og sikt var avhengig av røyklaget og røyklagshøyden.

Ettersom røyklaget skulle være eneste kriterie for kritiske forhold ble det undersøkt hvordan røyken dannes, hva den består av og hva slags effekt røyk har på mennesket. Det ble funnet at røyken hovedsakelig dannes ved at luft blandes med forbrenningsprodukter som varme gasser og partikler. Røyklaget som dannes inneholder toksiske produkter, kan ha høy temperatur, avgi stråling og redusere siktforhold. Alle disse forhold er med på å vanskeliggjøre sikker rømning.

Det ble i Argos foretatt 225 simuleringer, der det ble funnet at dannelsen av røyklag og røykproduksjonen er avhengig av henholdsvis energifrigjøringen i forhold til romstørrelsen og energifrigjøringen per areal. Videre ble det funnet at tid til kritisk røyklagshøyde vil ha en konstant økning ved endring av gulvareal dersom energifrigjøringen er konstant. Innenfor vekstperioden vil derimot ikke dette være tilfellet.

Ved sammenligningen ble det funnet at FDS gir mer konservative tilgjengelig rømningstider enn Argos. Resultatet kan ikke sies å være helt sammenlignbart, da inngangsfilene til programmene beskrev ulike energifrigjøringer per areal. Det ble likevel gjort en sammenligning som viste at tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklagshøyde, ved enkelte tilfeller var flere minutter lengre i Argos, sammenlignet med FDS. På det meste skilte programmene 5 minutter i tilgjengelig rømningstid, noe som er av stor betydning for prosjektering av sikker rømning.

Ingen av programmene gjengir virkeligheten, men FDS kan tenkes å ha større forutsetning for å tilnærme seg brannsituasjoner som ikke nødvendigvis danner en tydelig lagdeling. Mens Argos simulerer brannsituasjonen i løpet av minutter, vil FDS kunne bruke mange timer. Det må derfor vurderes hvilken situasjon som er antatt å oppstå og om en to-sone modell er tilstrekkelig for å estimere tilgjengelig rømningstid.

Som en del av oppgaven ble det utarbeidet et verktøy for rask estimering av tilgjengelig rømningstid ved design av bygg, til bruk i prosjektering og byggemøter. Verktøyet ble basert på resultatene fra Argos og kan benyttes for alle areal mellom 100 m² og 750 m², ved bestemte energifrigjøringer og romhøyder. Selv om verktøyet er enkelt å benytte bør brukeren på lik linje som ved simuleringer i Argos og FDS ha kjennskap til brann som fenomen.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I dagens forskrift om tekniske krav til byggverk, Byggteknisk forskrift av 2010 (TEK 10), er det fremsatt funksjonskrav knyttet til sikker rømning.

Kapittel 11 §11 i TEK 10 sier at:

1. *Byggverk skal prosjekteres og utføres for rask og sikker rømning og redning. Det skal tas hensyn til personer med funksjonsnedsettelse.*
2. *Den tiden som er tilgjengelig for rømning, skal være større enn den tiden som er nødvendig for rømning fra byggverket. Det skal legges inn en tilfredsstillende sikkerhetsmargin.*

(Direktoratet for byggkvalitet, 2010)

Etter dagens ordning kan funksjonskravene fra forskriften oppfylles ved å følge veiledningen til teknisk forskrift, VTEK 10, eller ved analytisk dimensjonering. Det vanligste er ofte en kombinasjon. I forbindelse med verifikasjon av oppfylte funksjonskrav vil det i flere tilfeller være nødvendig å fastsette tilgjengelig og nødvendig rømningstid fra byggverk eller deler av byggverk.

I dag fastsettes gjerne tilgjengelige rømningstider ved databeregninger i programmer med varierende kompleksitet. Generelt ved beregninger vil brukeren av slike programmer måtte spesifisere en rekke ulike parametere blant annet knyttet til brannens effekt og vekst. I den forbindelse eksisterer ulike standarder som oppgir dimensjonerende størrelser til bruk i beregninger, gjerne basert på virksomheten i bygget, eksempelvis NS-EN 1991-1-2 «Laster på konstruksjoner ved brann» (Standard Norge, 2008).

Når den tilgjengelige rømningstiden betraktes ved kritiske forhold knyttet til menneskelige tålegrenser¹ kan det vises at røyklagshøyden er et forhold som er mindre påvirkelig sett i sammenheng med andre dimensjonerende forhold som stråling og temperaturer (Tosolini, Grimaz, Cinzia Pecile, & Salzano, 2012). Dette gir muligheter for å definere tid til kritiske forhold i byggverk basert utelukkende på røyklagshøyden.

1.2 Problemstilling

I denne oppgaven skal det sees på tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklagshøyde. Hovedformålet med oppgaven er å estimere tilgjengelig rømningstid i forsamlingslokaler av ulik størrelse. Tilgjengelig tid skal estimeres ved å bruke anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde samt datamodeller for å beregne røykfylling i rom. Tilgjengelig tid vil i oppgaven bli beregnet ved bruk av en to-sone modell (ARGOS). For noen utvalgte case vil det også bli gjort sammenligninger med en mer avansert datamodell (FDS) for å se om estimatet på tilgjengelig tid varierer ved bruk av forskjellige dataverktøy.

Som en del av det endelige resultatet skal det utarbeides et brukervennlig verktøy som gir umiddelbare estimat på tilgjengelig tid i forbindelse med prosjektering og byggemøter.

¹ Kritiske forhold kan også knyttes til bæreevnen for konstruksjoner

1.3 Begrensinger

- For å beskrive tilgjengelig rømningstid i denne oppgaven, er det valgt å ta utgangspunkt i fire variabler. Tid til kritisk røyklagshøyde vil bli fremstilt ved simulering av forsamlingslokaler som varierer i størrelser som gulvareal, branneffekt, takhøyde og åpninger.
- For å vurdere tilgjengelig rømningstid finnes det flere to-sone modeller og CFD program. Til denne oppgaven er det valgt å benytte Argos og FDS.
- Resultatet fra simuleringene vil kun bli fremstilt for en rask brannvekst
- Oppgaven baserer seg på at tilgjengelig rømningstid kan baseres på røyklagshøyde alene, og andre kritiske forhold som kan oppstå i eller rundt brannrommet vil derfor ikke være vurdert.
- Det vil kun bli gjort simuleringer ved kvadratiske eller tilnærmet kvadratiske gulvareal.
- Det vil kun bli gjort simuleringer ved enkle flate takgeometrier.
- Oppgaven vil anta at det kun er brannrommet som opplever belastning fra brann. Der som det finnes naborom og i hvilken grad disse vil ha kritiske røyklagshøyder vil ikke bli beskrevet eller vurdert.
- Simuleringer og tid til kritisk røyklagshøyde er basert på at brannrommet er et forsamlingslokale, der personoppholdet til tider er stort, og antall utganger er begrenset.
- Oppgaven vil ikke beskrive tiden som er nødvendig for sikker rømning.
- Tålegrenser for konstruksjoner vil i denne oppgaven ikke bli tatt hensyn til.
- Åpninger vil være vurdert som dører på gulv plan. Oppgaven tar ikke hensyn til åpninger som eventuelt befinner seg i høyden, vinduer, og som kan ha betydning for tiden til kritisk røyklagshøyde. Det antas dermed at disse åpningene forblir stengt gjennom hele brannforløpet.
- I forbindelse med sammenligning vil det bli simulert i FDS. Det vil ikke bli foretatt en sensitivitetsanalyse for parametere som eventuelt har betydning for tiden som er tilgjengelig for sikker rømning i dette programmet.

2 Teori

I dette kapittelet vil det bli introdusert generell teori for brann i et rom med fokus på røyk og røyklagsdannelse.

2.1 Sikker rømning

For å oppnå sikker rømning fra et byggverk i brann, må personer som oppholder seg i byggverket evakuere innen den tid som er tilgjengelig for rømning. Den tilgjengelige rømningstiden er tiden fra brannstart til forholdene som oppstår i deler av byggverk er slik at sikker rømning ikke lenger er mulig. Tiden kjennetegnes ved overskridelse av akseptkriterier basert på menneskelige tålegrenser, se avsnitt 2.3.2. (SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, 2006)

Det er av stor betydning for sikkerheten at tiden personer i brannrommet, og resten av bygget, bruker for å ta seg til sikkert sted, er mindre enn den tilgjengelige rømningstiden. Den tiden personer benytter på å ta seg til et sikkert sted kalles for nødvendig rømningstid. Sikkerhetsmargin er differansen mellom tilgjengelig tid til rømning og nødvendig tid til rømning. Denne størrelsen skal i henhold til funksjonskravene i teknisk forskrift være tilstrekkelig stor, se figur 1. Figur 3 (SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, 2006)



Figur 1 – Tilgjengelig rømningstid

2.2 Brann i rom

En brann som får brenne fritt uten aktiv slukking vil gjennomgå forskjellige faser, antennesfasen, vekstfasen, fullt utviklet brann og utbrenningsfasen.

2.2.1 Fasene i en brann

En romsbrann vil starte i det små med en antennelse. Tilstrekkelig med energi må frigjøres fra et brennbart materiale slik at kjemiske reaksjoner kan løpe uten at det tilføres energi fra eksterne kilder. Antennelse kan skje ved pilotantennelse, spontanantennelse eller selvantennelse. Pilotantennelse er en antennelse ved sekundær energikilde som flamme, gnist eller glør. (Liebe, et al.). Ved spontanantennelse vil materialet bli påført energi i form av varme, til det når en temperatur der materialet vil pyrolysere² og deretter antenne. Ved selvantennelse vil materialet selv produsere energien som gjør at det antennes. (Karlsson & Quintiere, 2000) (Hagen, Grunnleggende brannodynamikk, 2004)

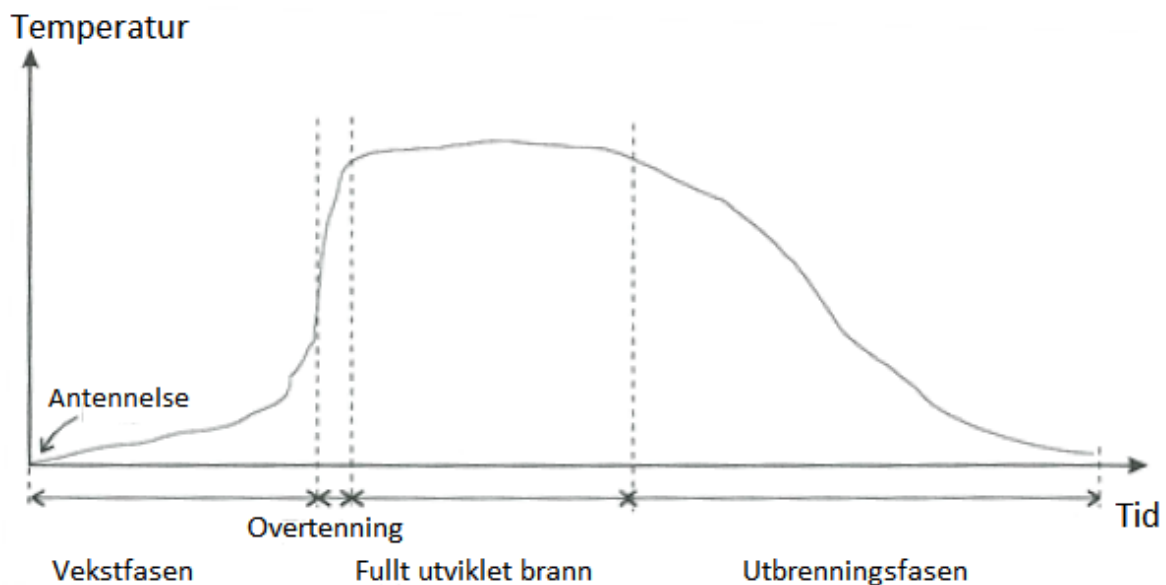
Med tiden vil brannen utvikle seg ved at flammene i brannen vil varme opp omkringliggende materialer, slik at disse pyrolyserer og antennes. Flammene avgir stråling tilbake til brannen, slik at massetapsraten og forbrenningsraten øker. Brannen vil vokse så lenge produksjonen av

² Termisk nedbrytning av materialer til væske eller damp (Drysdale, 2011)

brennbare gasser øker og tilgangen på oksygen er stor nok. Figur 2 viser hvordan en vekstfase kan utvikle seg. (Karlsson & Quintiere, 2000) (Hagen, Grunnleggende branndynamikk, 2004) Overgangen fra vekstperioden til fullt utviklet romsbrann kan skje ved fenomenet overtenning, se figur 2. Fenomenet kjennetegnes ved en ekstremt hurtig brannutvikling, med temperaturer i røyklaget tilsvarende 500-600 °C, varmestråling til gulvet på 15-20 kW/m² og flammer ut av åpninger (Karlsson & Quintiere, 2000). Den hurtige brannutviklingen skjer ved forbrenning av mengder uforbrent brensel, CO, i røyklaget (National Fire Protection Association, 2002, ss. 2-65).

Etter vekstperioden vil brannen nå sin maksimale energifrigjøring, og er fullt utviklet, se figur 2. Dette skjer ved at alle brennbare flater i rommet brenner og er kontrollert av mengden brensel eller oksygen som er tilstede. Ved ventilasjons kontrollert brann kan brennbare gasser forbrennes utenfor brannrommet. (Karlsson & Quintiere, 2000) (Hagen, Grunnleggende branndynamikk, 2004)

Etter hvert vil tilgang på brennbart materiale reduseres og brannen vil begynne å avta. Utbrenningsfasen regnes på i de tilfeller hvor byggets termiske påkjenning må vurderes (Rasbash, Ramachandran, Kandola, Watts, & Law, 2004). For å ivareta menneskers sikkerhet og sikker rømning, er det vanlig å se på de 30 første minuttene av brannforløpet, vekstfasen. (Karlsson & Quintiere, 2000) (Hagen, Grunnleggende branndynamikk, 2004)

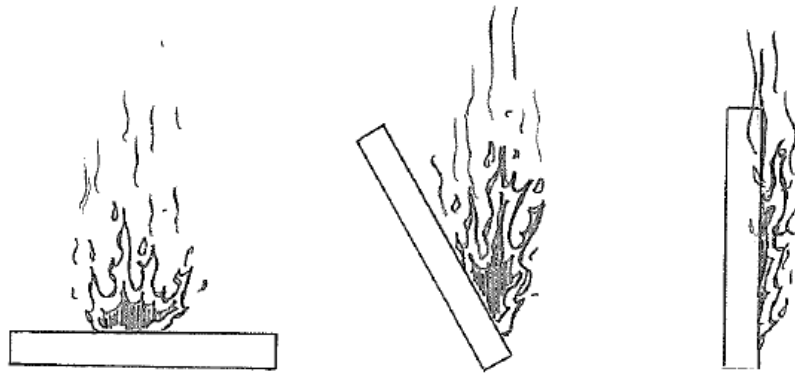


Figur 2 – Fasene i en brann uttrykt ved temperatur (Karlsson & Quintiere, 2000)

2.2.2 Varmetransport

Varmetransport i brannrommet skjer ved at varmen ledes inn i materialer i vegger, tak og gulv fra stråling og konveksjon i og fra røyklaget. Energi forlater også brannrommet i form av røyk ut åpninger. (Karlsson & Quintiere, 2000, s. 16) (Quintiere, 2006, s. 347)

I brannspredningens tidlige fase, domineres energitransporten av varmeledning og konveksjon. Orienteringen til objektet er av betydning for hvilke av de to mekanismene som dominerer, se figur 3. Eksempelvis vil varmeledning dominere i en tidlig fase ved horisontal brannspredning. (Hagen, Grunnleggende branndynamikk, 2004) (Rockett & Milke, 2002)



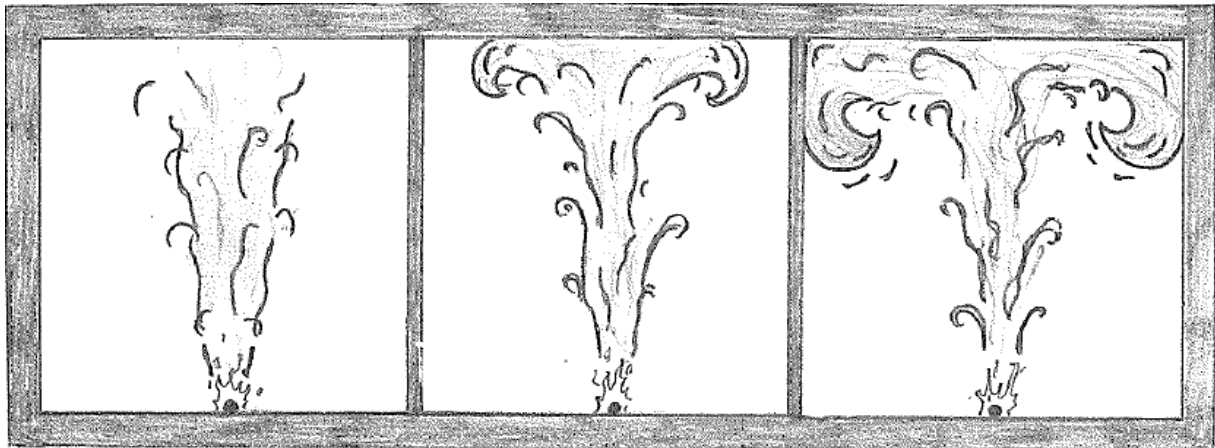
Figur 3 – Orientering av materiale. Illustrerende tegning som viser hvordan materialer kan bli påvirket i ulik grad av varmeledning og konveksjon. Figuren til venstre domineres av varmeledning. Figuren helt til høyre har fått et økende bidrag fra konveksjon

Når brannarealet øker og brannens diameter øker utover 0,3 meter, vil stråling bli den dominerende mekanismen for varmetransport. Stråling er elektromagnetiske bølger som absorberes, emitteres og reflekteres hos materialer og overflater. Stråling fra en brann er hovedsakelig forårsaket av sotpartikler fra forbrenningen som avgir stråling i alle retninger (Drysdale, 2011, s. 35) (Karlsson & Quintiere, 2000, s. 143). Spesielt for stråling som varmetransport er at den avhenger av temperatur i fjerde potens. (Drysdale, 2011)

2.2.3 Dannelse av røyklag

Etter antennelse vil forbrenningsprodukter danne en røyksøyle. Røyken fra en brann vil være varmere enn den omkringliggende luften, og vil på grunn av tetthetsforskjeller, stige mot taket. Turbulens i røyksøylen vil føre til innblanding av luft og økning av røykens volum. Brannens størrelse og høyden til taket vil spille inn på hvor mye luft som blandes inn i røyksøylen. (Karlsson & Quintiere, 2000)

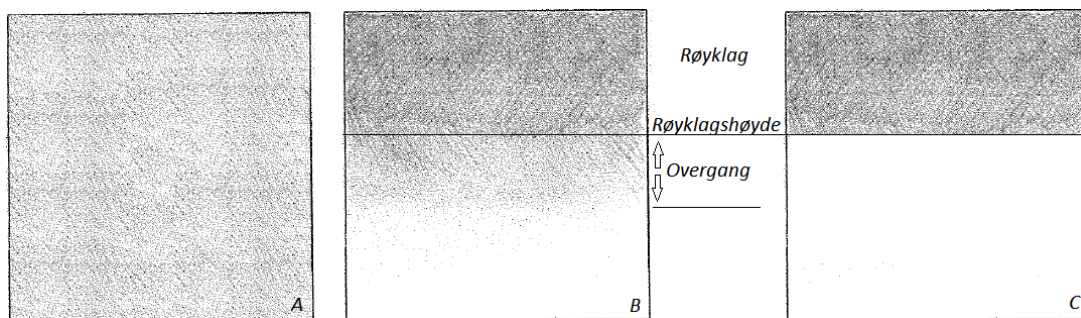
Røyksøylen treffer taket og danner en relativt rask strømning av et tynt røyklag langs taket, takjet. Takjeten drives av tetthetsforskjellene fra varm røykgass og luft. Turbulens ved takjetens nedre grense fører til innblanding av luft og en økning av røykvolum. Takjeten strømmer langs taket til den treffer en vegg. Her vil den bøyes av nedover, samtidig som mer luft blandes inn, se figur 4. Denne kontinuerlige miksingene fører til dannelsen av et lag med varmere gasser i øvre del av rommet. All innblanding av luft som følge av turbulens, gjør at kun en liten del av det dannede røyklaget består av forbrenningsprodukter. (Karlsson & Quintiere, 2000, s. 15)



Figur 4 – Dannelsen av røyklag. Bildet til venstre: røyksøylen er dannet. Bildet i midten: Røyksøylen treffer taket og danner en takjet. Bildet til høyre: Røyk avbøyes ved veggene.

Røykproduksjonen fra brannen vil øke som følge av økt forbrenningsrate ved spredning av brannen til andre og flere materialer. Som følge av økt røykproduksjon vil røyklaget vokse i dybde ned mot gulvet. Etterhvert som røyklaget vokser vil også varmestraling fra røyklaget bidra til økt forbrenningsrate. (Hagen, Grunnleggende branndynamikk, 2004) (Karlsson & Quintiere, 2000)

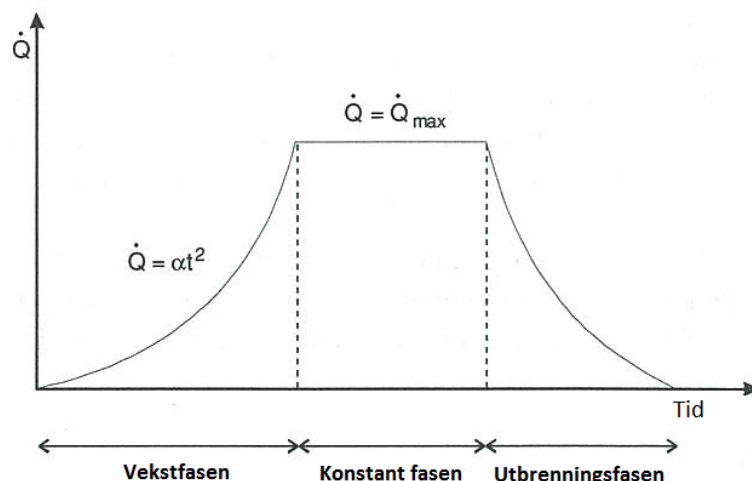
Røykfyllingen av brannrommet kan utvikle seg i flere retninger. Det kan oppstå tilstander der hele rommet fylles med røyk, én sone, eller der røyken samles under taket, to soner, se figur 5 A og B. For dannelse av to soner må røyklaget i brannrommet være tilstrekkelig varmt. Tilstanden vil blant annet være avhengig av rommets størrelse og branneffekt. I de tilfellene der det dannes to soner, vil grad av lagdeling avhenge av endringer i energifrigjøring, entalpistrømmen inn og ut av røyklaget, strømninger i røyklaget og varmetap til vegger og tak, se figur 5 B og C. (Rasbash, Ramachandran, Kandola, Watts, & Law, 2004, s. 261)



Figur 5 – Røykfylling av rom. Rom A er én sone, rom B er to soner med gradvis overgang og rom C er to soner med klart skille, brukt i dataprogram

2.2.4 Design brann og vekstfaktor

Ved design og konstruering av bygninger gir Byggteknisk forskrift krav for design av sikker rømning og strukturell stabilitet. Det er ikke mulig å designe et bygg ut fra alle mulige brannsituasjoner som kan oppstå. En designbrann er et verktøy som illustrerer hvordan energifrigjøringen i et brannforløp vil se ut, se figur 6



Figur 6 – Branneffekt i en designbrann (Karlsson & Quintiere, 2000)

En designbrann deles inn i vekstfase, konstant fase og utbrenningsfase. I vekstfasen vil energifrigjøringen i brannen akselerere. En metode å beskrive veksten på er ved αt^2 -brann, der koeffisienten α er vekstfaktoren og t er tiden fra etablert brann. Det er utviklet standard størrelser for α som korresponderer mot ultra rask-, rask-, medium-, og langsom brannutvikling. Faktoren fastsettes ofte på bakgrunn av virksomheten i byggverket, se tabell 1. (Karlsson & Quintiere, 2000)

I brannens konstante fase er energifrigjøringen ved sitt maksimale. Det må gjøres antagelser knyttet til brenselet eller ventilasjonsforhold for å vurdere den maksimale energifrigjøringen (Karlsson & Quintiere, 2000). Tabell 2 angir maksimal energiproduksjon knyttet til brensel og virksomhet.

Tabell 1 – Vekstrater gitt for forskjellig virksomheter

Vekstrate	α [kW/s²]	Type bruk
Langsom	0,003	Leiligheter, Transport (offentlig)
Medium	0,012	Hotell, sykehjem, klasserom i skole
Rask	0,047	Kontor, skole, Teater, Bibliotek
Ultra rask	0,19	Kjøpesenter, underholdningssenter

(Karlsson & Quintiere, 2000) (Standard Norge, 2008)

Tabell 2 - Maksimal energifrigjøring relatert til brensel og virksomhet (Mayfield & Hopkin, 2011)

Maksimal Energi- frigjøring [MW]	Brensel	Virksomhet
0,5	Bærbar datamaskin og TV	
1	Sofakrok med bord og stoler	Ungdomsklubb
2,5	Bøker	Bibliotek
5	Oppbevaringsbokser	Lagringsrom
7	Klær	Klesbutikk
	Lekestativer(plast)	Innendørs lekeområde

2.3 Røyk og tålegrenser

Røyk er definert i *Kollegiet for brannfaglig terminologi* (Liebe , et al.) som
«Blanding av gasser og aerosoler, inkludert partikler og innblandet luft, som dannes ved forbrenning eller pyrolyse i en brann».

I henhold til Drysdale (2011) vil røyken også bestå av partikler og gasser som stammer fra ablasjon³.

Partikler utgjør mesteparten av røyken før innblanding av luft i røyksøylen. Disse dannes ved ufullstendig forbrenning i soner med høye temperaturer og lite oksygen. Dannelsen av partikler ved forbrenning er ikke begrenset til faste materialer og forekommer også hos gasser og væsker. I flammens indre sone forekommer reaksjoner som produserer sotpartikler. Partiklene klynger seg sammen og forlater brannen som røykpartikler i størrelser i overkant av 1 µm. (Drysdale, 2011, ss. 442-443)

Sammensetningen av brennbare materialer spiller en rolle i røykproduksjonen, da ulike stoffer vil ha ulike egenskaper for dannelse av sot. Røyken inneholder farlige gasser som stammer fra ufullstendig-, fullstendig forbrenning og pyrolyse (Hirst, 1989, s. 55). Disse gassene vil avhenge av hva som forbrennes og vil opptre i ulike konsentrasjoner. (Drysdale, 2011, ss. 10, 443)

Fraksjonene for produksjon av partikler og gasser er meget sensitive for endringer i brannscenariet og spesielt tilgangen på luft. Røyken som produseres vil avhenge av hvilken oksidering⁴ som finner sted. (Drysdale, 2011, ss. 10, 442, 450)

2.3.1 Effekt av eksponering av røyk

Røyk påvirker mennesker som oppholder seg i brannrommet gjennom temperatur, stråling, sikt og toksisk innhold.

³ «Bortføring av materiale i overflaten ved fordamping, smelting, avskalling eller slitasje.» (Foreningen SNL, 2009)

⁴ Flammebrann eller ulmebrann

Utviklingen i brannrommet vil føre til temperaturøkning, og de høye temperaturene kan føre til heteslag, blemme dannelser og andre forhold som vanskeliggjør rømning, se tabell 3. Heteslag vil være den dominerende effekten ved temperaturer under 121 °C. Ved temperaturer over 121 °C vil blemme dannelse dominere. Høye temperaturer og store mengder sot, vil føre til stråling fra røyklaget. Denne termiske strålingen fører til smerter, blemme dannelser og brannskader på eksponert hud. Ved en strålingsintensitet inntil 2,5 kW/m², vil menneskelig toleranse være på opptil flere minutter, mens ved en strålingsintensitet på 10 kW/m² vil toleransetiden kun være noen få sekunder (National Fire Protection Association, 2002). (Klote & Milke, 2002),

Tabell 3 – Menneskelig reaksjoner på eksponering av temperaturer (Opstad & Stensaas, 1998)

Menneskelig reaksjon	Temperatur i røykgassen [°C]
Fare for heteslag	<120
Blemmedannelser	>120
Vanskelig å puste	125
Toleransetid på 5 minutter	140
Krevende å puste med munnen. Kritisk temperatur for rømning	150
Uutholdelig smerte	160
Irreversible skader ved 30 sekunders eksponering	180
Mindre enn 4 minutters toleransetid	205

Uavhengig av om situasjonen i brannrommet danner én- eller to soner vil røyken påvirke siktforholdene. Sikten i brannrommet uttrykkes ved optisk tetthet. Den dimensjonsløse optiske tettheten per lengdeenhet i røyken finnes ved å måle reduksjonen i en lyskilde over en kjent avstand. Sikt finnes ved invers optisk tetthet. Sikten påvirker orienteringsevne og dermed valg av utganger og rømningsvei. Ganghastigheten vil også reduseres av sikten, se tabell 4. Dette gir forlenget opphold i toksisk og varm sone. (Klote & Milke, 2002)

Toksiske røykgasser deles inn i kvelende og irriterende gasser, se tabell 5. De vanligste kvelende gasser er karbonmonoksid og hydrogencyanid (blåsyre) som begge har tilstrekkelig konsentrasjoner i røyk for akutt skadevirkning. Karbonmonoksid virker hemmende på oksygenopptaket og reduserer transporten av oksygen i kroppen. Hydrogencyanid hindrer bruken av oksygen til metabolismen i cellene og på lik linje med CO reduseres oksygentilførselen til hjernen. Det er karbonmonoksid som er funnet å utgjøre den største faren i forbindelse med rømning. I omtrent 50 % av dødsfall knyttet til brann er denne gassen medvirkende. (Hagen, Grunnleggende branndynamikk, 2004, s. 23) (Drysdale, 2011, s. 455)

Vanlige irriterende stoffer i røyk, er akrolein og hydrogenklorid (saltsyre/HCl). Akrolein forekommer i røyk fra treverk, mens HCl forekommer i røyk fra materialer som inneholder klor, som vinylbelegg, møbler og isolasjon av elektriske ledninger. Produksjonen av Akrolein er avhengig av forholdene som forekommer i brannrommet, mens produksjonen av HCl er konstant. (Drysdale, 2011, s. 455)

Tabell 4 – Effekten av optisk tetthet i røyklaget på sikt og ganghastighet (Hoelsbrekken, 2004) (National Fire Protection Association, 2002)

Tilnærmet sikt	Optisk tetthet [OD/m]	Effekt
Klar sikt	Ingen	Ganghastighet 1,2 m/s
2 meter	0,5	Ganghastighet 0,3 m/s
Redusert	0,2	Ganghastighet 0,3 m/s
Ca 3 meter	0,33	30 % vil velge en annen vei

Tabell 5 – Toksiske tålegrenser

Gass	Effekt	Tålegrenser [ppm]	Forklaring	LC₅₀¹ ved 30 minutters eksponering [ppm]
CO	Kvelende	< 2000 800 1400	Ved 2 meters høyde-kort eksponering ⁴ Eksponering < 30 min ³ Handlingslammelse < 30 min ²	3000
HCN	Kvelende	90	Handlingslammelse < 30 min ²	150
HCl	Irriterende	1000	Forventet handlingslammelse ³	3800
Akrolein	Irriterende	30	Forventet handlingslammelse ³	300
CO ₂	Kvelende	< 5 % < 6 %	Ved 2 meters høyde ⁴ Handlingslammelse < 30 min ²	470.000
O ₂		>15 % ³ ≈ 17 % 14 – 10 % 10 – 6 %	Mister koordinasjonsevne ⁵ Mister dømmekraft og raskt utslitt ⁵ Mister bevissthet ⁵	

¹ Dødelig konsentrasjon i 50 % av tilfellene

² (Dr. Weng, 2010)

³ (Milke, Hugue, Hoskins, & Carrol, 2005)

⁴ (Boverkets författningssamling, 2013)

⁵ (Hartzell, 1989)

2.3.2 Kritiske forhold og akseptkriterier

Kritiske forhold kjennetegnes ved overskridelse av akseptkriterier for de ulike forhold. Akseptkriterier bygger på menneskets tålegrenser av forhold som oppstår ved brann. Når en kritisk verdi overskrides, er per definisjon forholdene slik at sikker rømning ikke lenger er mulig. (Hagen, Brannteknisk rømningsanalyse, 2008)

Kapittel 11 §11 punkt 5 i TEK 10 sier at:

I den tid branncelle eller rømningsvei skal benyttes til rømning av personer, skal det ikke kunne forekomme temperaturer, røykgasskonsentrasjoner eller andre forhold som hindrer rømning.

Veiledningen sier videre at slike forhold må dokumenteres med referanse i anerkjent litteratur. (Direktoratet for byggkvalitet, 2010)

I et brannrom endres forholdene kontinuerlig. Sikt, varmestråling, temperatur og toksisitet vil kunne utvikle kritiske forhold som hindrer sikker rømning, se tabell 6. Varmestråling, temperatur og toksisitet sies å være dødelige faktorer, mens nedsatt sikt vil føre til forlenget eksponering av forholdene. (Opstad & Stensaas, 1998).

Tabell 6 – Akseptkriterier for sikker rømning (Boverkets författningssamling, 2013)

Forhold	Akseptkriterier
Røyklagshøyde	1,6 m + 10 % av romhøyde(m)
Temperatur	$\leq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
Stråling	Vedvarende: $\leq 2,5\text{ kW/m}^2$ Kortvarig: $\leq 10\text{ kW/m}^2$
Sikt	2,0 meter over gulvnivå –10,0 meter i rom større enn 100 m ² –5,0 meter i rom mindre eller lik 100 m ²
Toksisitet	2,0 meter over gulvnivå –CO < 2000 ppm –CO ₂ < 5 % –O ₂ > 15 %

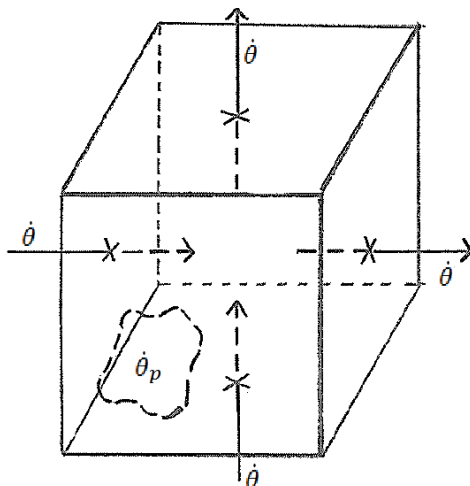
Tosolini, Grimaz, Pecile og Salzano (2012) beskriver et forsøk gjort for å se på sensitiviteten til kriterier for tilgjengelig rømningstid. De fant at røyklagshøyden er den minst sensitive parameteren for å avgjøre tilgjengelig rømningstid og at det er den parameteren som først når kritiske forhold. Dette støttes av Sigurd Hoelsbrekken (2004) som sier at kritiske forhold normalt faller sammen med røyklagets høyde, og at kritiske forhold derfor kan beregnes på grunnlag av røyklagets høyde.

I Norge, i dag, eksisterer det ingen standard som fastsetter kriterie for kritisk røyklagshøyde. Fra Svensk standard BBRAD 3 finnes kritisk røyklagshøyde som 1,6 meter + 10 % av romhøyden. Det Danske institutt for brannsikkerhet og teknologi definerer den samme størrelsen. (Boverkets författningssamling, 2013, s. 10) (Hoelsbrekken, 2004, s. 132)

2.4 Generelt om bevaringsligninger

Når ulike brannsituasjoner skal vurderes med hensyn på sikker rømning er det ofte behov for å si noe om stråling, temperatur, røyklagshøyde og sikt. I den forbindelse er kjennskap til masse, energi og bevegelsesmengde sentral. Disse størrelsene finnes ved å vurdere startsituasjonen i brannrommet, for så å føre regnskap på størrelsene utover i brannrommets utvikling. Dette regnskapet føres ved bruk av bevaringsligninger for masse, energi og bevegelsesmengde. I to-sone modeller benyttes bevaringslikninger både som utgangspunkt for å beskrive

røyksøylen gjennom røyksøyleteorier, men også til beregning av røyklagshøyde og temperatur i røyklaget. Mens to-sone program på det meste bevarer størrelser i to soner per rom, bevarer CFD program størrelser i opptil millioner av celler per rom. Brannrommet deles dermed inn i forskjellig antall volum, kontrollvolum, som størrelser bevares over, se figur 7.



Figur 7 – Strømninger gjennom et kontrollvolum i to dimensjoner med produksjon eller forbruk innenfor volumet

Likning 2.1 beskriver en generell likning for bevaring av de ulike størrelsene uttrykt ved θ

$$\frac{d\theta}{dt} + \left(\sum_{j=1}^k \theta_{j,inn} - \sum_{i=1}^n \theta_{i,ut} \right) - \theta_p = 0 \quad (\text{likning 2.1})$$

Der $\frac{d\theta}{dt}$ er endringsraten av størrelse θ innenfor et volum, $\sum_{j=1}^k \theta_{j,inn}$ er mengden θ tilført systemet per tidsenhet, $\sum_{i=1}^n \theta_{i,ut}$ er mengden θ ut av systemet per tidsenhet og θ_p er mengde produsert eller forbrukt innenfor systemgrensene per tidsenhet. For en romsbrann kan dette knyttes til størrelser som energi i kald luft inn, energi i røyk ut og produsert energi fra brannen.

Masse

Det generelle uttrykket sier at endringen av masse innenfor grensene må tilsvare summen av masse inn og ut av grensene, samt masse produsert, altså

$$\left(\frac{\Delta \text{masse}}{\text{innenfor systemgrensene}} \right) + \left(\frac{\text{Netto massestrøm}}{\text{inn i systemet}} \right) - \left(\frac{\text{Produsert og forbrukt masse}}{\text{innenfor systemgrensene}} \right) = 0$$

Massen inn i volumet er i likningen over definert som positiv retning. En positiv differanse mellom masse ut- og inn av grensene vil svare til akkumulasjon av masse innenfor volumet. (Karlsson & Quintiere, 2000)

Bevegelsesmengde

Bevegelsesmengde er gitt som produktet mellom masse og hastighet. Bevaring av bevegelsesmengde kan forenklet vurderes ved samme generelle ligning,

$$\left(\frac{\Delta \text{bevegelsesmengde}}{\text{innenfor systemgrensene}} \right) + \left(\frac{\text{Netto bevegelsesmengde}}{\text{inn i systemet}} \right) - \left(\frac{\text{Produsert eller forbrukt bevegelsesmengde}}{\text{innenfor systemgrensene}} \right) = 0$$

Energi

Med utgangspunkt i ligningen for bevaring av masse kan bevaring av energi defineres. Det er da energien i massen som tilkommer, forlater, produseres eller forbrukes i volumet som vurderes. Uttrykket sier at endringen av energi innenfor grensene må tilsvare summen av energi inn og ut av grensene, samt energi produsert, altså

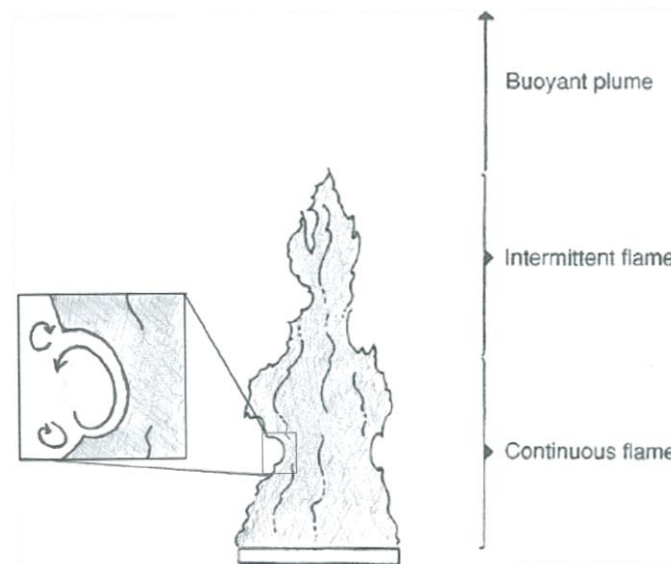
$$\left(\frac{\Delta \text{energi}}{\text{innenfor systemgrensene}} \right) + \left(\frac{\text{Netto energi inn}}{\text{i systemet}} \right) - \left(\frac{\text{Produsert energi}}{\text{innenfor systemgrensene}} \right) = 0$$

(Karlsson & Quintiere, 2000)

2.5 Turbulens

Turbulens observeres som virvler av roterende elementer som innehar ulike størrelser og hastigheter. Virvlene ruller opp langs røyksøylen og avhengig av størrelse, sørges det for transport og blanding av masse og temperatur, samt molekylær miksing (Ertesvåg, 2000, s. 42). Forenklet resulterer dette i at forbrenningen kan løpe og at store mengder luft blandes inn i røyksøylen.

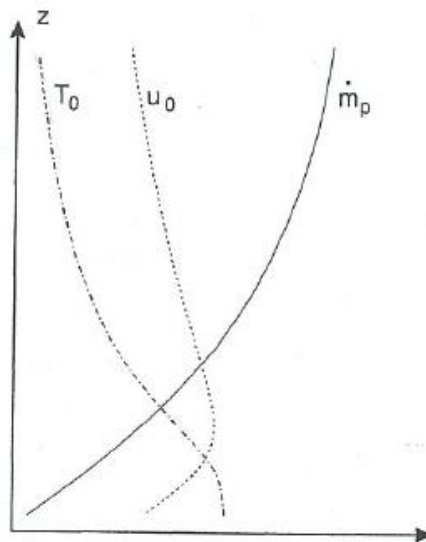
Det er i den kontinuerlige og fluktuerende sonen at de største skjærspenninger som avhenger av temperatur og hastighet oppstår. Disse påvirker dannelsen av store turbulente virvler som gjennom å strekkes lengre og tynnere, «vortex stretching» og ved akselerasjon av nærliggende fluid, påvirker til dannelsen av mindre virvler, se figur 8 (Ertesvåg, 2000, s. 122). De minste turbulente virvlene som blant annet forårsaker molekylær miksing og muliggjør forbrenning kan forekomme i lengdeskalaer ned til 10^{-6} m med fluktuasjoner tilsvarende 10 kHz. (Rasbash, Ramachandran, Kandola, Watts, & Law, 2004, s. 299).



Figur 8 – McCaffreys inndeling av røyksøylen med utdrag av turbulent virvel (Karlsson & Quintiere, 2000)

2.6 Røyksøyle

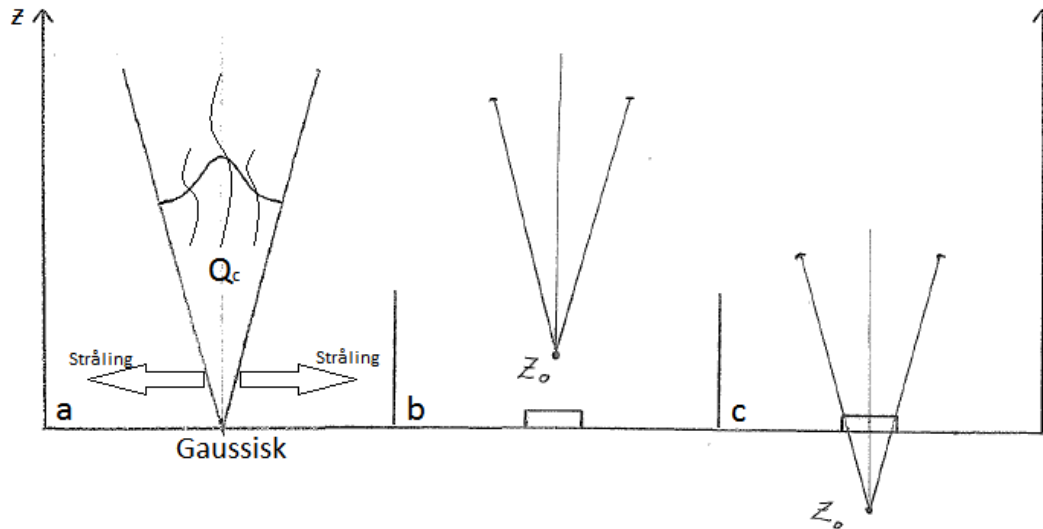
Turbulensen som sørger for transport og blanding av masse og temperatur er også av stor betydning for karakteristikken til røyksøylen. Figur 9 viser hvordan temperatur, hastighet og massestrømmen varierer med høyden i en oppdriftsdominert røyksøyle. Temperaturen observeres som størst i flammens nedre sone hvor det foregår en kontinuerlig forbrenning, se inndeling av røyksøylen ved figur 8. I figur 9 flammens fluktuerende sone er forbrenningen redusert og innblanding av luft øker gjennom turbulens noe som reduserer temperaturen. I denne sonen like under gjennomsnittlig flammehøyde er hastigheten i røyksøylen ved sitt maksimale, men avtar oppover i røyksøylen som følge av redusert temperaturforskjell ved innblanding av luft. Turbulensen oppover i røyksøylen sørger for at store mengder luft blandes med forbrenningsproduktene fra brannen. Den største innblanding finner sted i røyksøylens øvre sone, se figur 8. Figur 9 viser hvordan massen i røyksøylen øker med høyden samtidig som at hastigheten og temperaturen avtar.



Figur 9 – Temperatur, hastighet og massestrømmen som funksjon av høyde i røyksøylen (Karlsson & Quintiere, 2000)

En kjent modell for å beregne masseproduksjon, temperatur og hastighet i røyksøylen er Heskestads røyksøyleteori. Teorien viderefører antagelser fra den ideelle røyksøyleteori og tar høyde for branneffekt og brannareal, samtidig som det tas høyde for hvor i røyksøylen det skal gjøres beregninger.

Det vil være forskjeller i masseproduksjon ved betraktning over eller under flammehøyden. Heskestad introduserte ulike ligningssett for å ta høyde for effekten av turbulens og innblanding som følger. Røyksøyleteorien baseres på empirisk data og gir enkle ligninger for tilnærming av størrelser som avhenger av kompliserte fenomen. Heskestads røyksøyleteori gjenkjennes ved virtuelt origo, konvektiv energifrigjøring, gaussisk hastighetsprofil. Det virtuelle origo vurderer forholdet mellom brannareal og energifrigjøring, se figur 10. Den konvektive energifrigjøringen tar høyde for at 20–40 % av brannens energifrigjøring forsvinner til stråling. Mens den gaussiske hastighetsprofilen sier at hastighet og temperatur ikke er konstante over radiusen.



Figur 10 – a) Gaussisk-profil med konvektiv energifrigjøring, b og c) Heskestads virtuelle origo, over og under brannkilden. Dersom verdi av Z_0 er negativ, vil punktet ligge under brannkilden. Dette indikerer at brannarealet er stort, sammenlignet med energifrigjøringen

Heskestad fant følgende ligninger for flammehøyden, virtuelt origo og masseproduksjon:

Flammehøyde:

$$L = 0.235 \dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1.02D \quad \text{Likning 2.2}$$

Virtuelt origo:

$$z_0 = 0.083 \dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1.02D \quad \text{Likning 2.3}$$

Der \dot{Q} er total energifrigjøring og D er brannens diameter.

Masseproduksjon ved flammehøyde høyere enn røyklaget, $z < L$:

$$\dot{m}_p = 0.0056 \dot{Q}_c \frac{z}{L} \quad \text{Likning 2.4}$$

ved flammehøyden lavere enn røyklaget, når $z > L$:

$$\dot{m}_p = 0.071 \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} (z - z_0)^{\frac{5}{3}} + 1.92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_c \quad \text{Likning 2.5}$$

Der z er høyden fra gulv til røyklag og \dot{Q}_c er den konvektive energifrigjøringen, som tilsvarer 0,6-0,8 \dot{Q} .

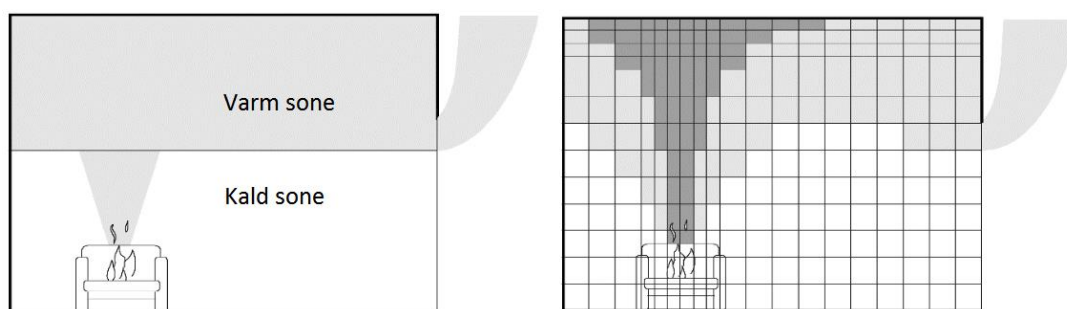
3 Brann- modellering og simulering

En modell er en gjengivelse av noe, eksempelvis et fysisk fenomen, men som ikke beskriver fenomenet fullstendig (Ertesvåg, 2000, s. 31). Turbulens er et eksempel på et fenomen som beskrives ved modeller. Turbulensen som oppstår i forbindelse med stigende røyk fra en varmekilde er vanskelig å beskrive i sin helhet. I stedet eksisterer det modeller som forsøker å gjengi eller ta høyde for de viktigste momentene som turbulensen forårsaker. Hestekstads røyksøyleteori er et eksempel på en modell for masseproduksjon fra en varmekilde. Viktige praktisk uløselige prosesser som modelleres er turbulens, stråling, sot produksjon, pyrolyse, flammespredning og forbrenning (Karlsson & Quintiere, 2000, s. 3). Ettersom modellene er en gjengivelse er det feilprosjenter knyttet til bruken av dem.

De ulike dataprogrammene på markedet har ulik grad av kompleksitet og nøyaktighet. Dette er ikke entydig med at ulike programmer vil gi forskjellige svar ved samme beregning eller at mer kompliserte programmer har mer korrekte svar.

3.1 To-sone modeller

En to-sone modell tar utgangspunkt i at brannrommet danner én eller to soner. Ved to soner deles rommet inn i en øvre sone for varmere gasser og nedre sone for kaldere luft, se figur 11. Modellen baserer seg på fysiske fenomen observert i virkelige brannsituasjoner. Det antas at sonene er homogene i hele volumet. Forholdene innenfor sonene beregnes ved bevaringslikninger for masse og energi og er tilnærmet ved modeller for røyksøyler. Programmer som benytter denne type modellering av en romsbrann kan forutsi størrelser som brannvekst, røyklagstemperatur, røyklagskonsentrasjoner og røyklagshøyde. (Rasbash, Ramachandran, Kandola, Watts, & Law, 2004, ss. 257, 270-271) (Dansk brand- og sikringsteknisk institut, 2009)



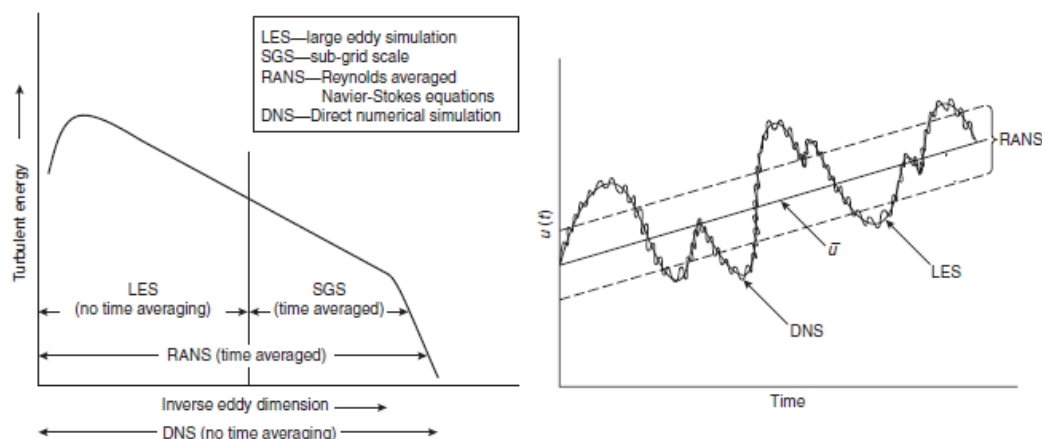
Figur 11 - Inndeling av rom for to-sone- og CFD program. Til venstre vises tilnærming for to-sone og til høyre for CFD program. (Karlsson & Quintiere, 2000)

3.2 Computational Fluid Dynamics

Mens to-sone program deler rommet inn i ett eller to kontrollvolum, så deler CFD program rommet i et stort, men varierende, antall kontrollvolum slik figur 11 viser. Kjernen i ethvert CFD program er bevaringslikningene for masse, energi og bevegelsesmengde. Det finnes flere metoder for å tilnærme seg størrelsene som kreves for å løse bevaringslikningene. De fleste simuleringsprogram benytter modeller til å beskrive disse størrelsene. Viktigst er modeller for

turbulens ettersom turbulens sørger for transport og blanding av masse og molekylær miksing. (McGrattan & Miles, 2008, ss. 3-230, 3-231)

Direct Numerical Simulation (DNS) beregner alle turbulente strukturer direkte på gridpunktene, uten bruk av modeller, se figur 12. Kontrollvolumene må være tilstrekkelig små, slik at alle bevegelser forårsaket av turbulens beregnes. Denne type beregning er ikke anvendelig til praktiske strømningsproblemer, da de minste turbulente virvler er i størrelses orden 10^{-6} meter og kan fluktuere ved 10 kHz. (McGrattan & Miles, 2008, ss. 3-231)



Figur 12 - De to figurene viser hvordan DNS, LES og RANS har ulike fremgangsmåter for å modellere og beregne turbulensen. (National Fire Protection Association, 2002)

Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) er en fremgangsmåte for fullstendig modellering av turbulente strukturer. Den konserverte variabelen dekomponeres i en middel- og fluktuerende verdi, se figur 12. Tidsskalaen forbundet med den tids-midlede verdien er flere sekunder, mens for den fluktuerende verdien kun millisekunder. (McGrattan & Miles, 2008, ss. 3-231)

Large Eddy Simulation (LES) er en tilnærming som forsøker å løse strømningsene for de største virvlene og modellere de minste virvlene. Dette skjer ved at LES benytter filterfunksjoner med en bestemt lengdeskala, Δ . Virvler større enn Δ er store virvler som beregnes direkte, mens mindre virvler modelleres, se figur 12. Lengdeskalaen Δ kan, men trenger ikke være, identisk til cellestørrelsen i nettverket (Ferziger & Peric, 2002, s. 278). LES kan forstås som en blanding mellom DNS og RANS. (McGrattan & Miles, 2008, ss. 3-234)

Både CFD og to-sone programmene kan benyttes til å finne tilgjengelig rømningstid. Det er både fordeler og ulemper knyttet til programmene, se tabell 7.

Tabell 7 - Fordeler og ulemper ved to-sone og CFD programmer

To sone modell	CFD
Fordeler: <ul style="list-style-type: none"> • Enkelt brukergrensesnitt • Kort simuleringstid • Enkel filbehandling (utdata) 	Fordeler: <ul style="list-style-type: none"> • Større grad av beregning • Kompliserte geometrier • Spesifiseringsmuligheter • Kostnadsfritt
Ulemper: <ul style="list-style-type: none"> • Modellering • Behandler ikke bevegelsesmengde • Forbeholdt enkle geometrier <ul style="list-style-type: none"> ○ Rektangulær ○ Økt feilprosent ved vurdering av flere rom • Anskaffelses kostnad 	Ulemper: <ul style="list-style-type: none"> • Tungt brukergrensesnitt • Tidkrevende • Krever mye datakraft

3.3 Argos

Dansk brand- og sikringsteknisk institutt, DBI, har utviklet brannsimuleringsverktøyet Argos. Programmet egnes til simulering av brannutvikling og røyktransport for branner i rom og forutsetter antagelsen om at et brannrom opplever en tilstand av én- eller to soner (Husted, Deibjerg, Bygbjerg, & Westerman, 2003). Simulerte størrelser tilnærmes ved bruk av modeller (Dansk brand- og sikringsteknisk institutt, 2009). Forsikringsselskaper og myndigheter er blant aktørene som benytter to-sone programmet (Dansk brand- og sikringsteknisk institutt).

Brannsituasjonen i Argos kan velges fra en liste over ulike branner blant annet basert på tilstanden til brenselet, fast og flytende. Ved valgt brann modelleres innblanding av luft i røyksøylen fra empiriske uttrykk. Argos tillater bruken av røyksøyleteori fra Heskestad eller McCaffrey. Heskestad er foretrukket da den ikke benytter Boussinesq tilnærming og tar høyde for areal av brannen. (Dansk brand- og sikringsteknisk institutt, 2009)

For dannelse av røyklag må temperaturen på røyken som treffer i lengste horisontale avstand i taket, max distance, fra varmekilde være minimum 10 K over romtemperaturen, se figur 13. Dette beregnes ved likning 3.1

$$T_{jet} = T_0 + \frac{5,38}{h} \left(\frac{\dot{Q}_c}{(1 - \chi_{rad}) \times r_{max}} \right)^{2/3} \quad \text{Likning 3.1}$$

$T_0 = 293,15 \text{ K}, 20 \text{ °C}$

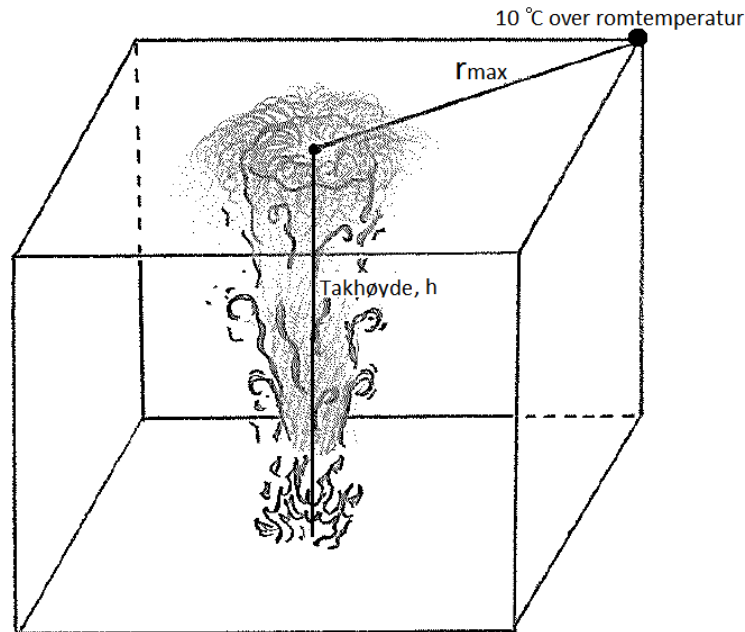
$\dot{Q}_c = \text{konvektiv varmetilførsel}$

$r_{max} = \text{Max distance}$

$h = \text{romhøyde}$

$\chi_{rad} = \text{strålingsfraksjonen fra energifrigjøring}$

(Dansk brand- og sikringsteknisk institutt, 2009)



Figur 13 - Temperaturkriteriet

Når røyklaget er dannet fungerer to-sone modeller overordnet slik at bevaring av masse regnes ved bruk av røyksøyleteori. Deretter regnes bevaring av energi ved vurdering av brannens energifrigjøring. Ved hjelp av energiendringen finnes en røykgasstemperatur som sammen med den kjente massen kan benyttes til å finne volumet av røykgassen og dermed finne røyklagshøyden basert på rommets gulvareal og takhøyde.

3.4 Fire Dynamics Simulator(FDS)

FDS er utgitt av National Institute of Standards and Technology (NIST) og er et gratis computational fluid dynamics (CFD) program med åpen-kildekode. Programmet er rettet mot å løse praktiske brannproblemer knyttet til ingeniørers oppgaver i forbindelse brannsikring, men har også vært tiltenkt som et verktøy for å studere forbrenning og branndynamikk. (National Institute of Standards and Technology)

FDS løser numerisk en form av Navier-Stokes ligningene egnet for branner hvor tetthetsforskjeller er den dominante drivkraften, *low Mach number* $< 0,3$. Røyk- og varme transport er spesielt vektlagt. Behandling av turbulens skjer ved Large Eddy Simulation, men Direct Numerical Simulation kan også benyttes. (National Institute of Standards and Technology, 2015)

I FDS eksisterer ikke en grense som adskiller øvre og nedre sone, slik som i to-sone modellering. Røyklagshøyden blir estimert på bakgrunn av en kontinuerlig vertikal temperaturprofil gitt ved funksjonen $T(z)$. Funksjonen gir temperaturen ved høyden z , der $z = 0$ er gulvnivå og $z = H$ er romhøyde. For å tilnærme røyklagshøyden benyttes et krav for masselikevekt, likning 3.2 og en matematisk metode for å regne gjennomsnitt, likning 3.3. Metoden for gjennomsnitt er uten fysisk betydning.

$$I_1 = \int_0^H \frac{1}{T(z)} dz = (H - z_{int}) \frac{1}{T_u} + z_{int} \frac{1}{T_l} \quad \text{likning 3.2}$$

$$I_2 = \int_0^H T(z) dz = (H - z_{int})T_u + z_{int}T_l \quad \text{likning 3.3}$$

I_1 og I_2 er løsningen på integralene og er størrelsen som FDS regner seg frem til for å finne røyklagshøyden. T_u og T_l er den uniforme tenkte temperaturen i øvre og nedre sone. Fra kildekoden til FDS fremkommer T_l som temperaturen i gridcellen ved gulvnivå, mens T_u elimineres fra uttrykket og beregnes på et senere tidspunkt som funksjon av røyklagshøyde og T_l . Når I_1 og I_2 er kjent bestemmes røyklagshøyden, z_{int} , ved likning 3.4.

$$z_{int} = \frac{T_l(I_2 I_1 - H^2)}{I_2 + I_1 T_l^2 - 2T_l H} \quad \text{likning 3.4}$$

(Janssens & Tran, 1992) (National Institute of Standards and Technology, 2015, ss. 209-210)
(National Institute of Standards and Technology, 2015, s. Linje 7081)

4 Simuleringsdata og Resultat

I dette kapitlet presenteres variable og konstante parameterstørrelser knyttet til romstørrelser og brann. Resultat av gridsensitivitetsanalysen for simulering i FDS vil også bli presentert

4.1 Inngangsdata

Det er valgt å benytte følgende program til å fastsette tilgjengelig rømningstid,

DBI Argos versjon 5.8.92.414.

For sammenligning av resultat benyttes CFD programmet,

Fire Dynamics Simulator (FDS) 6.1.2.

For å gi en stor variasjon av forsamlingslokaler og ulike brannscenarioer er det blitt simulert ved en rekke variabler, se tabell 8. Det vil bli variert mellom alle variablene og totalt vil dette utgjøre 225 simuleringer i Argos. For simulering i FDS vil det bli simulert for utvalgte variabler, beskrevet nedenfor. Totalt ble det gjort 18 simuleringer i FDS.

Tabell 8 – Variabler simuleringene bygger på

Antall åpninger	Romhøyder [m]	Maksimal energi- frigjøring [MW]	Romstørrelser [m ²]
Ingen	3	0,5	100
2	5	1	250
4	8	2,5	400
		5	500
		7	750

Gulvareal

Arealene er valgt på bakgrunn av å kunne beregne tilgjengelig rømningstid for forsamlingslokaler av ulike størrelser. Det er benyttet enkle kvadratiske og tilnærmet rektangulære gulvareal.

Romhøyde

Valgte romhøyder er valgt for å beregne tilgjengelig rømningstid for forsamlingslokaler av ulike størrelser. Valgte høyder er tre, fem og åtte meter. Ved sammenligning av Argos og FDS vil det simuleres ved takhøydene tre og åtte meter.

Brannvekst

NS-EN 1991-1-2 angir vekstfaktorer basert på virksomhet, se tabell 1. Det er valgt å simulere de ulike romgeometriene ved en rask brannutvikling. Denne utviklingen svarer til virksomheter som skole, teater og bibliotek som alle er eksempler på forsamlingslokaler ved ulike størrelser.

Maksimal energifrigjøring

Maksimal energifrigjøring er ved simuleringer i denne rapport regnet som den maksimale energifrigjøringen fra en tenkt brann i deler av et rom. Det at brannen er fullt utviklet, betyr ikke at rommet har opplevd overtenning og at alle flater brenner, men at den tenkte brannsituasjonen er ved det maksimale. Den maksimale energifrigjøringen fastsettes ved vurdering av brensels- eller ventilasjons kontrollerte forhold. I denne oppgaven er ikke brenselsforhold vurdert, men ventilasjonsforholdenes betydning på energifrigjøringen vurderes av programvaren basert på åpninger i rommet. Maksimal energifrigjøring er valgt for å vurdere ulike brannsituasjoner.

Ved sammenligning vil det bli simulert for maksimale energifrigjøringer på 0,5 MW, 2,5 MW og 7 MW.

Åpninger

Størrelsene på åpningene er satt med utgangspunkt i standard størrelser oppgitt av Norsk Dør AS. Åpningene måler 1,0 meter i bredde og 2,0 meter i høyde. Det varierer mellom to, fire og ingen åpninger. For simuleringer i FDS er det kun simulert ved fire åpninger.

Stråling

Strålingsfraksjonene vil kunne variere mellom 0,2-0,4 avhengig av sotproduksjonen til brannen. Det er valgt å benytte standard strålingsfraksjon fra Argos og FDS (for LES) i simuleringer, denne er satt til 0,35. (Husted, Deibjerg, Bygbjerg, & Westerman, 2003) (National Institute of Standards and Technology, 2015)

Brannens plassering

«Max Distance» sier noe om brannens plassering i rommet og avstanden takjeteen må forflyttes for å danne et røyklag, se likning 3.1. Størrelsen måles som lengste horisontale avstand fra røyksøylens senter til vegg, basert på brannens tenkte plassering, se figur 13. Ved simulering i både Argos og FDS er brannens plassering i senter av rommene.

Sot produksjon

Argos tillater endringer i parameterstørrelsen «Optical Smoke Potential dB/m». Størrelsen omhandler tettheten til produsert røyk og anses ikke av betydning for røyklagshøyden. Sensitivitetsanalyse for denne parameteren ligger på vedlagt minnepenn.

Brannareal

Energifrigjøringen per kvadratmeter i Argos har en standardverdi på 500 kW. Denne verdien er funnet fornuftig sett i samsvar med tabell 2, og benyttes i simuleringene. Til eksempel,

- (i) Brann i sofakrok tilsvarende 1 MW, vil ha brannareal lik 2 m^2 .
- (ii) Brann i klesbutikk tilsvarende 7 MW, vil ha brannareal lik 14 m^2 .

I FDS ble det spesifisert et konstant brannareal til energifrigjøringen. For sammenligningen måtte energifrigjøringen per kvadratmeter endres i Argos slik at det tilsvarte brannarealet i FDS ved fullt utviklet brann.

Materialer

Det er valgt å simulere rom med én type materiale, betong. Materialet anses å være av betydning for grad av stratifisering på grunn av varmetransport og bør vurderes individuelt i de tilfeller der termiske egenskaper avviker stort fra betong. Størrelsen vurderes ikke av betydning for røyklagshøyden.

Simuleringstid

Det er benyttet maksimal simuleringstid i de to programmene. I FDS avsluttes beregninger etter 420 simulerte sekunder, tilsvarende 7 minutter av brannen. Kritiske forhold som oppstår etter denne tiden vil ikke fremstilles. Dette skyldes at simuleringer i FDS er tidkrevende, og det antas i de fleste tilfeller at rommene er evakuert innenfor denne tiden. I Argos avsluttes beregninger ved 60 simulerte minutter, dette skyldes at det tidsmessig ikke er nødvendig å kutte i simuleringstid.

4.2 Gridavhengighet

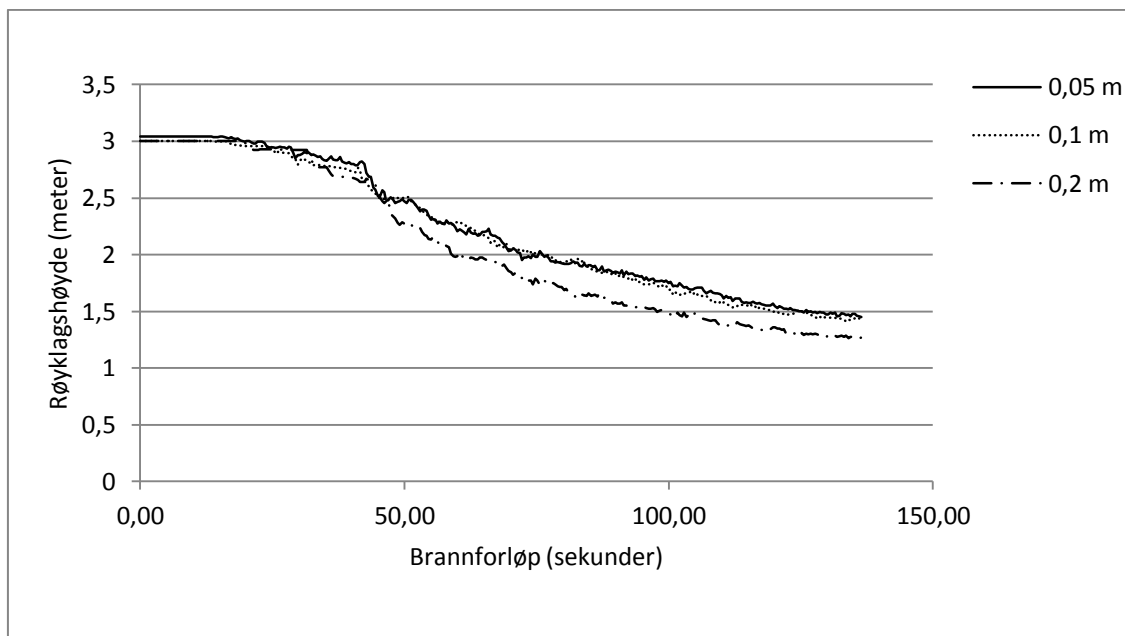
Resultatet av simuleringer er avhengig av cellestørrelsen i domenet. FDS tilnærmer seg en løsning, og cellestørrelsen må være tilstrekkelig liten for at det beregnede resultatet skal svare til programmets endelige løsning, konvergens av resultat.

Den dimensjonsløse størrelsen $\frac{D^*}{\delta_x}$ gir en indikasjon på hvilke cellestørrelser som kan brukes for å oppnå konvergens og er et mål på om strømminger innenfor domenet løses tilstrekkelig. D^* er karakteristisk diameter for brannen og δ_x er nominell cellestørrelse. D^* , er gitt ved likning 4.1

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Likning 4.1}$$

der nevneren angir tetthet (ρ), varmekapasitet (C_p) og temperatur (T_a) for luft ved initialforhold, samt kvadratroten av lokal gravitasjon (g). Verdiene for dette dimensjonsløse forholdet skal være mellom 4 og 16. Hvor høyere tallverdi indikerer at cellestørrelsen er liten, fint nettverk. (National Institute of Standards and Technology, 2015, s. 37) Det fremgår av det dimensjonsløse forhold at branneeffekten er den viktigste parameterstørrelsen for fastsetting av cellestørrelse.

Til gridavhengighetstest ble det gjennomført grovberegninger basert på presentert uttrykk. Basert på resultatet av beregningene ble det funnet cellestørrelser som var løselige i domenet med hensyn til rommets geometri og åpninger. Med løselig menes at cellestørrelsen kan endres innenfor beregningsdomenet uten at dette skal påvirke simuleringssubjektet, flytte vegger og åpninger i nevneverdig grad. Grovberegningen la grunnlag for gridavhengighetstest ved 0.05 -, 0.1- og 0.2 meter cellestørrelse. Størrelsene førte til konvergens av resultat i FDS slik figur 14 viser for maksimal energifrigjøring ved 0,5 MW.



Figur 14 - Løsning konvergerer ved maksimal branneffekt 0,5 MW for celledørelsene 0,1 og 0,05 meter.

Den foretrukne celledørelsen etter vurdering av gridavhengighetstesten er 0,1 meter. Fullstendig oversikt over grafer fra gridavhengighetstesten finnes i Vedlegg B Gridavhengighetstest. Tabell 9 angir verdier for forholdet $\frac{D^*}{\delta_x}$ ved bruk av foretrukket celledørelsen, 0,1 meter. Ser av tabellen at verdiene er innenfor eller bedre for alle brannstørrelser enn anbefalt verdi, 4-16.

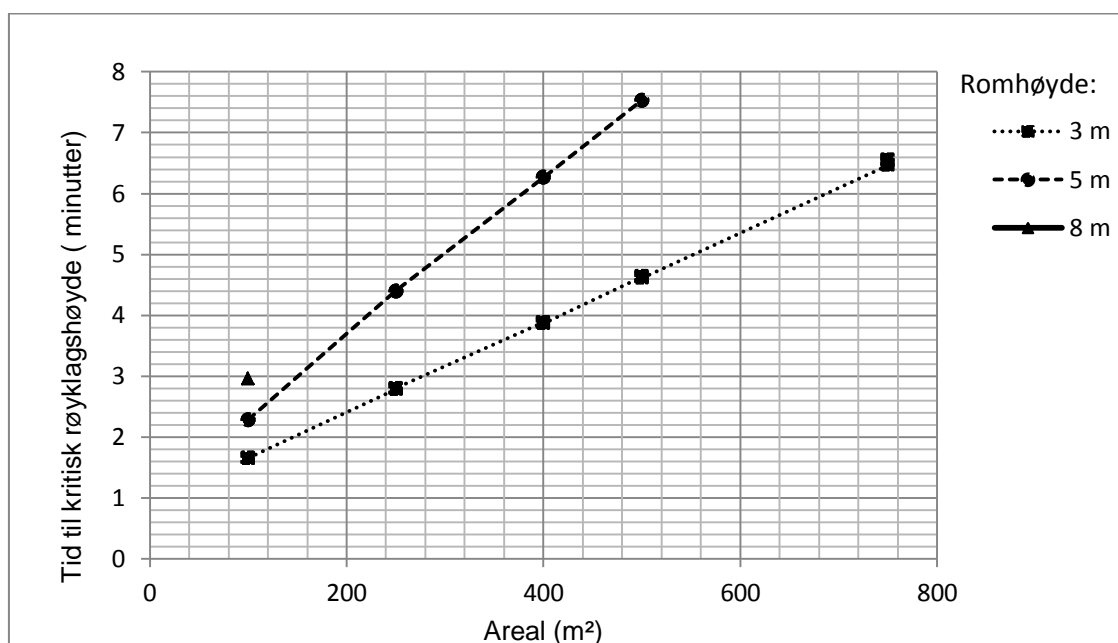
Tabell 9 – Det dimensjonsløse forholdet D^*/dx . Kontroll av foretrukket celledørelse etter gridavhengighetstest			
Effekt [MW]	D^*	δ_x [meter]	$\frac{D^*}{\delta_x}$
0,5	0,727	0,1	7,27
2,5	1,383	0,1	13,83
7	2,089	0,1	20,89

5 Resultat

I dette kapittelet skal det fremstilles grafer for tilgjengelig rømningstid ved ulike maksimale effekter. Grafene baseres på tid til kritisk røyklagshøyde for forsamlingslokaler ved ulike størrelser. I kapittelets første avsnitt vil det bli presentert resultater fra simulering i Argos, deretter fremstilles resultat ved sammenligning mellom Argos og FDS.

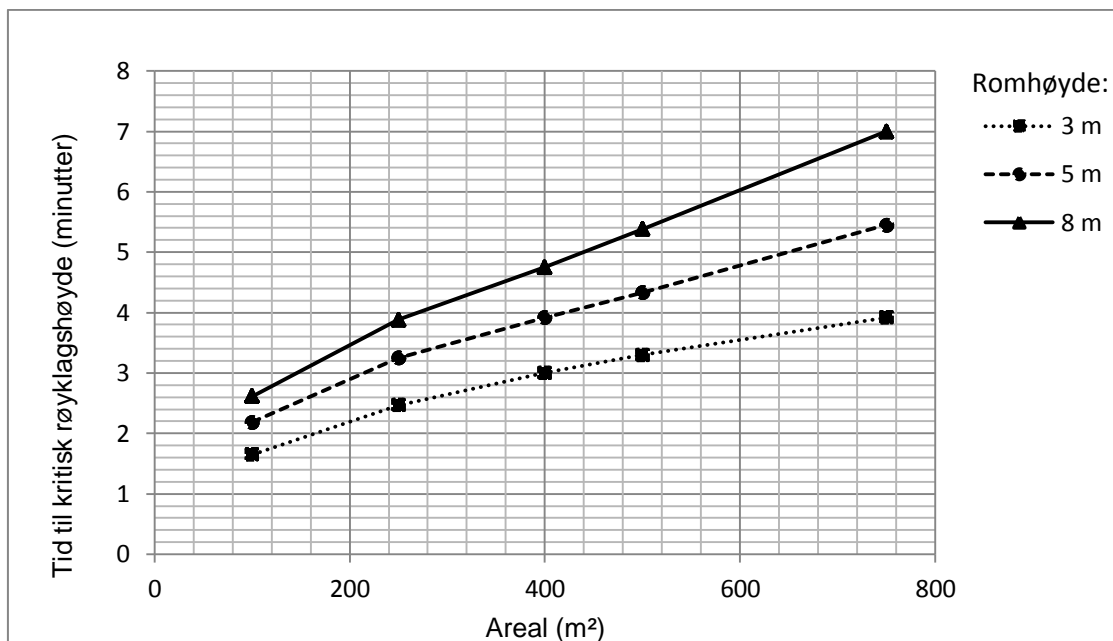
5.1 Argos

Grafene fremstiller tilgjengelig rømningstid etter modellering i Argos, og kurvene representerer forskjellige romhøyder. Kritisk tid leses av y-aksen ved å finne ønskelig areal på x-aksen og ved takhøyde, tre, fem eller åtte meter, for en bestemt maksimal branneffekt.



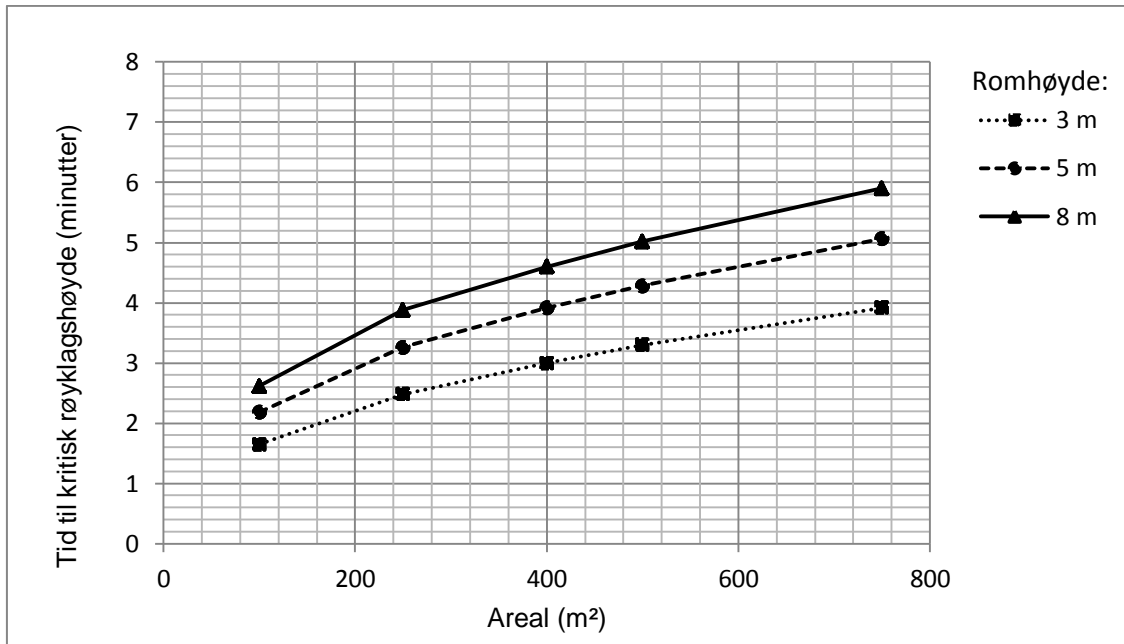
Figur 15 - Tid til kritisk røyklagshøyde som funksjon av areal og høyde ved maksimal energifrigjøring 0,5 MW og rask brannutvikling

Figur 15 viser tilgjengelig rømningstid ved maksimal energifrigjøring på 0,5 MW. Kurvene viser en tilnærmet lineær økning av tilgjengelig rømningstid ved endring i areal. Kurvene som representerer fem og åtte meters romhøyde vil ikke nå kritiske forhold ved alle gulvareal. Ved mindre areal, 100 m², er det en forskjell i tid til kritisk røyklagshøyde på 30 sekunder mellom hver kurve. Når arealet økes til 500 m² er forskjellen i tid til kritisk røyklagshøyde 3 minutter og 36 sekunder mellom kurvene for tre og fem meters romhøyde. Ved økning i areal øker differansen i tilgjengelig rømningstid mellom kurvene.



Figur 16 - Tid til kritisk røyklagshøyde som funksjon av areal og høyde ved maksimal energifrigjøring 2,5 MW og rask brannutvikling

Figur 16 viser tilgjengelig rømningstid ved en maksimal branneffekt på 2,5 MW. Ved denne branneffekten vil alle romstørrelser oppnå kritiske forhold. Kurvene skiller seg fra figur 15 ved at økningen i tilgjengelig rømningstid ikke fremstår som like lineær. Tilgjengelig rømningstid ved 500 m² for figur 16 er 3 minutter og 15 sekunder og 4 minutter og 15 sekunder ved tre og fem meter. Til sammenligning er tilgjengelig rømningstid i figur 15 for kurvene tre og fem meter henholdsvis 4 minutter og 36 sekunder og 7 minutter og 30 sekunder. Differansen mellom kurvene tre og fem meter er ved 2,5 MW på 1 minutt. Det observeres at tid til kritisk røyklagshøyde og differansen mellom kurvene generelt er redusert når den maksimale effekten er økt til 2,5 MW.

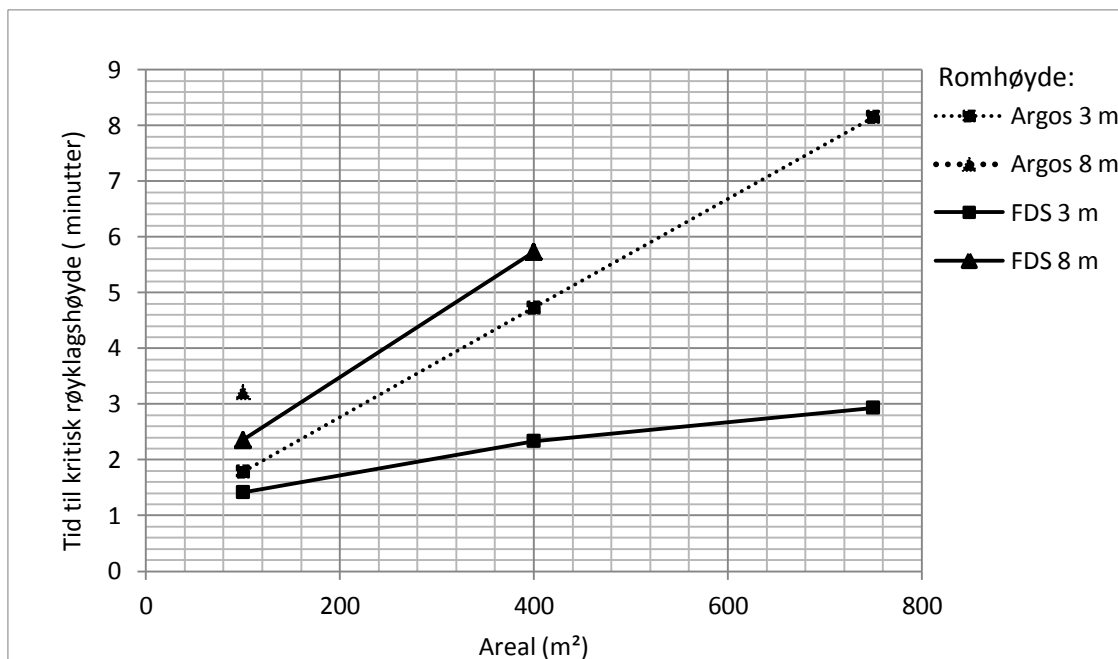


Figur 17 - Tid til kritisk røyklagshøyde som funksjon av areal og høyde ved maksimal energifrigjøring 7 MW og rask brannutvikling

Figur 17 viser tilgjengelig rømningstid ved en maksimal branneffekt på 7 MW. Alle romstørrelser oppnår kritiske forhold. Ved 500 m² er tilgjengelig rømningstid for tre, fem og åtte meter henholdsvis 3 minutter og 15 sekunder, 4 minutter og 15 sekunder og 5 minutter. Dette er omtrent tilsvarende som grafen ved 2,5 MW maksimal effekt. Avstanden mellom kurvene fremstår likevel mindre når arealet økes utover 500 m², i forhold til figur 16.

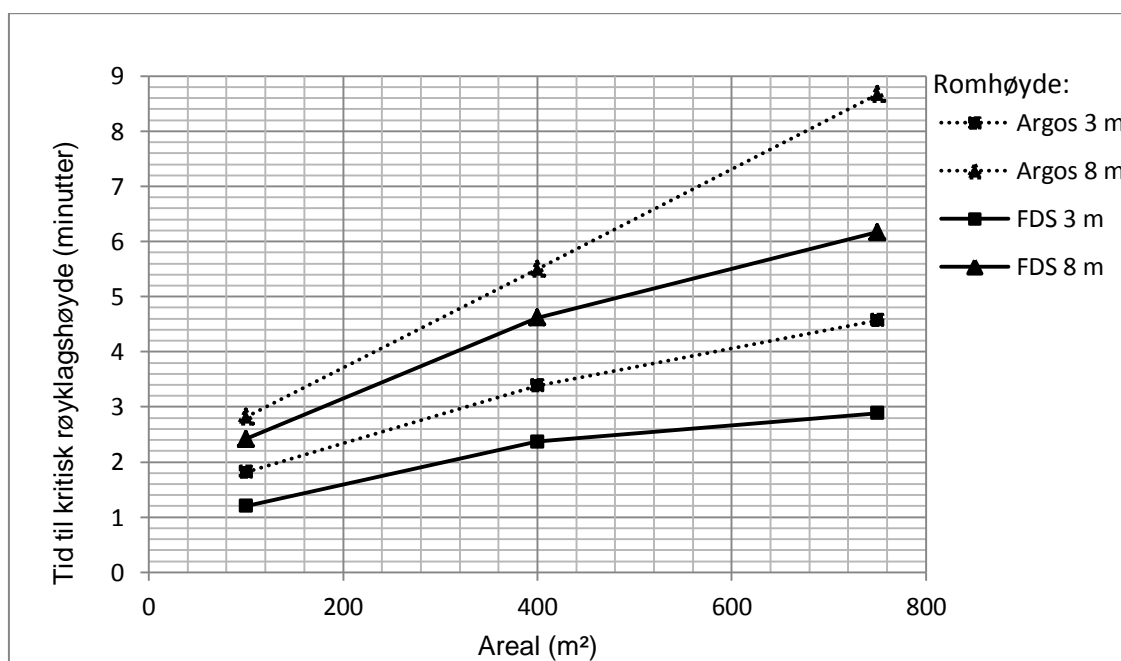
5.2 Argos og FDS

For å sammenligne Argos og FDS er det gjort endringer i brannareal, se avsnitt 4.1, slik at brannsituasjonene ved simulering i de ulike programmene er tilnærmet like. Det vil derfor være noen endringer i resultat fra Argos. Hver kurve i grafen viser tilgjengelig rømningstid ved to forskjellig takhøyder, tre og åtte meter. Kurvene baseres på simulering av tre forskjellige gulvareal, 100 m², 400 m² og 750 m² og tre forskjellige maksimale energifrigjøringer, 0,5 MW, 2,5 MW og 7 MW.



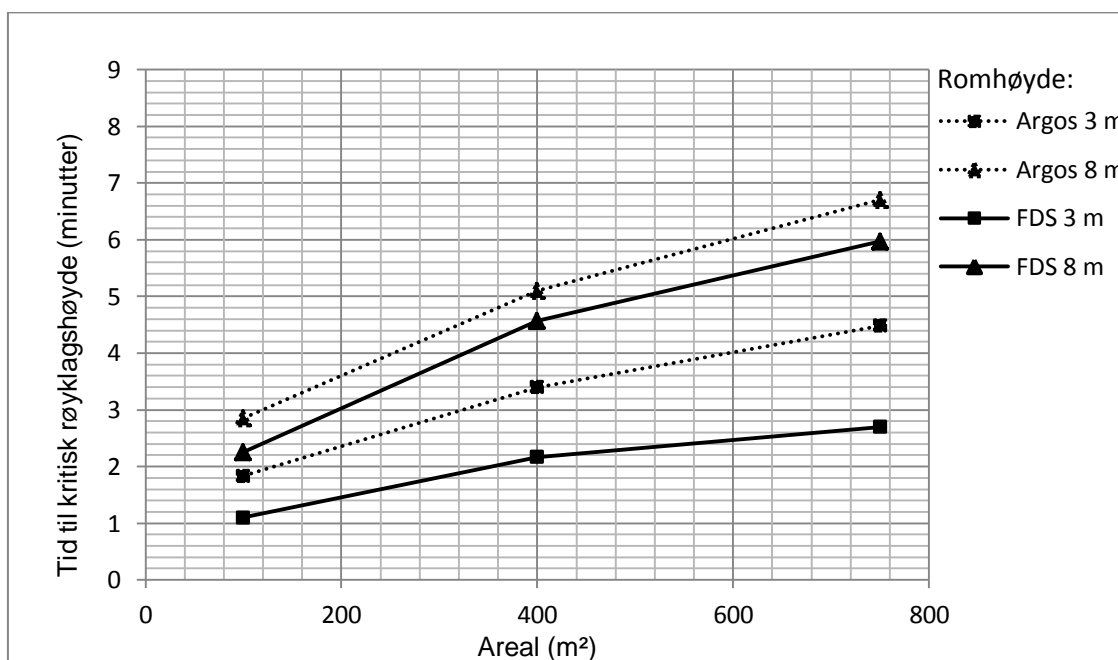
Figur 18 - Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 0,5 MW

Figur 18 - Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 0,5 MW viser at tid til tilgjengelig rømningstid ved tre meters romhøyde ikke samsvarer når arealet øker. Ved 100 m² er differansen under 30 sekunder mellom kurvene, men øker til 5 minutter ved 750 m². Ved åtte meters romhøyde oppstår det ikke kritisk røyklagshøyde ved alle arealer. Simulering i FDS viser at det har oppstått kritisk røyklagshøyde ved 400 m², tilsvarende resultat ble ikke funnet ved simulering i Argos. Ved 750 m² er det ikke oppnådd kritisk røyklagshøyde innenfor simuleringstiden. Når simuleringen ble avsluttet var røyklaget i FDS ved 3 meter.



Figur 19 - Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 2,5 MW

Figur 19 - Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 2,5 MW viser at kurvene for Argos og FDS følger en relativt lik utvikling, men distanseres ved økning av gulvareal, spesielt for kurvene ved åtte meters romhøyde. Avstanden er her ved 400 m² under 1 minutt, mens ved 750 m² er avstanden over 2 minutter og 30 sekunder. resultatene distanseres med over 1 minutt og 30 sekunder. Ved kurvene for tre meters romhøyde skiller kun 36 sekunder fra 400 m² til 750 m².



Figur 20 - Sammenligning FDS og Argos ved maksimal energifrigjøring 7 MW

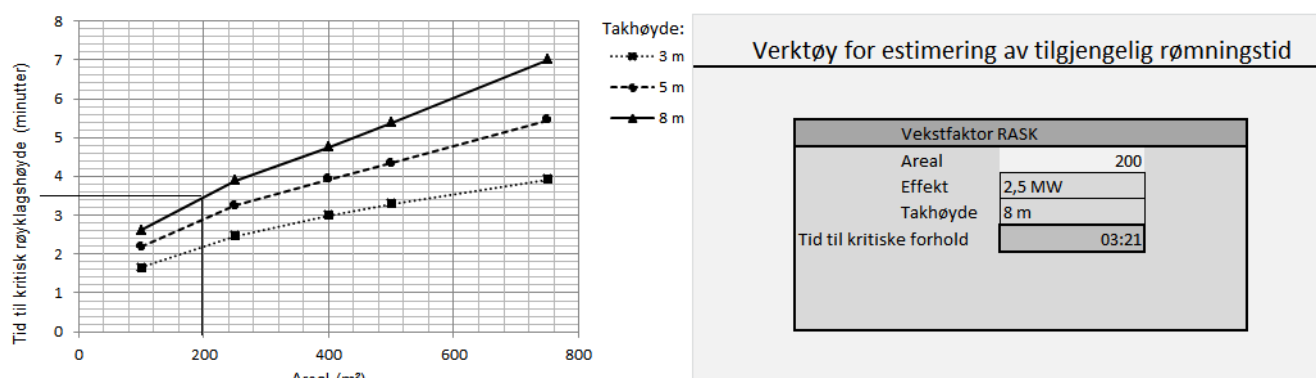
Figur 20 viser ved åtte meters takhøyde at kurvene for simulering i Argos og FDS har forholdsvis lik tilnærming. Når gulvarealet øker skiller kurvene seg med omtrent 40 sekunder. Ved tre meters takhøyde er forskjellene mellom kurvene for tilgjengelig rømningstid større. Det fremkommer av resultatet at FDS gir mer konservative tilgjengelige rømningstider basert på kritisk røyklagshøyde.

6 Diskusjon

På bakgrunn av anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde er det gjort simuleringer med ulike variabler i to-sone modellen Argos for å finne tilgjengelig rømningstid. Det er på bakgrunn av dette resultatet utarbeidet et verktøy for rask estimering av tilgjengelig rømningstid. Den tilgjengelige rømningstiden er for noen situasjoner sammenlignet med resultat fra CFD programmet FDS. Resultatet vil her bli diskutert opp mot teori.

6.1 Resultat

På bakgrunn av anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde er det funnet tilgjengelige rømningstider ved bruk av to-sone modellen Argos. Basert på resultatet er det utarbeidet et verktøy som gir et estimat på tilgjengelig rømningstid. Verktøyet baserer seg på trendlinjer funnet i Microsoft Excel, tilnærmet hovedsakelig ved potens og polynom funksjoner. Verktøyet kan beregne tilgjengelig rømningstid for alle gulvareal mellom 100 m² og 750 m² ved bruk av forhåndsbestemte maksimale energifrigjøringer og takhøyder. Den tilgjengelige rømningstiden fra verktøyet tilsvarer den tilgjengelige rømningstiden funnet i resultatet, se figur 21.



Figur 21 - Estimeringsverktøy basert på resultat. Ved et gulvareal tilsvarende 200 m², maksimal energifrigjøring lik 2,5 MW og en takhøyde på 8 meter ble resultatet 3 minutter og 21 sekunder for både graf og verktøy

Ser av figur 21 at verktøyet gir en tilgjengelig rømningstid på 3 minutter og 21 sekunder for et rom på 200 m² og 8 meters romhøyde, ved en maksimal energifrigjøring på 2,5 MW. Denne tiden tilsvarer tiden funnet fra grafen til venstre. Fordi verktøyet er basert på trendlinjer, vil det ikke kunne gi eksakt samme tilgjengelige rømningstid ved hvert gulvareal. En grovvurdering av feilmarginen viser et maksimalt avvik på 10 sekunder, noe som er ubetydelig i en slik sammenheng.

Verktøyet er testet ved gulvareal som opprinnelig ikke var inngangsdata for simuleringene. Stikkprøvene fra verktøyet viste sammenlignet med nye simuleringer i Argos at det ikke var noen større feilmargin enn ved grovvurderingen. Likevel må det poengteres at det kun er gjort stikkprøver av resultatene.

Verktøyet er ment å kunne brukes i den tidlige byggeprosessen, gjerne for arkitekter og ingeniører under prosjektering og byggemøter. Verktøyet kan gi en tidlig indikasjon på om det er behov for å endre arkitekturen av lokalet eller om det bør gjøres tiltak for å øke tilgjengelig rømningstid. Verktøyet gir kun et estimat og det må videre vurderes om det er behov for ytterligere vurdering av brannsituasjonen.

Verktøyet baseres kun på simuleringer ved kvadratiske geometrier, men kan også benyttes for rektangulære forsamlingslokaler. Den maksimale avstanden røyken må transporteres vil være større ved rektangulære forsamlingslokaler enn ved kvadratiske rom. Røyklaget vil derfor dannes senere og resultatet vil da være noe mer konservativt.

6.2 To-sone og Argos

To-sone modeller er enkle å benytte og brukeren kan raskt estimere størrelser som temperaturer, røyklagshøyder, sikt, stråling og varmetransport i forbindelse med romsbranner. Brann er ikke et forutsigbart fenomen, det er komplisert og utvikling avhenger av omgivelsene. Det å estimere tilgjengelig rømningstid ved anerkjente akseptkriterier for røyklagshøyde ved bruk av enkle to-sone modeller kan derfor by på utfordringer.

6.2.1 Temperaturkriteriet og dannelse av røyklag

To-sone modeller baseres på tilfeller observert i virkeligheten hvor røyklaget akkumuleres under taket og danner to relativt adskilte soner. Det at denne observasjonen er gjort, gjør den ikke gjeldene for alle branner. Likevel er det denne tilstanden i brannrommet som er utgangspunktet for to-sone modeller. Hvorvidt stratifisering oppstår avhenger av flere faktorer som blant annet energifrigjøring og romstørrelse. Argos forsøker å ta høyde for disse faktorer gjennom kriteriet for røyklagsdannelse, ved å vurdere temperaturen i lengste horisontale avstand fra brannkilden. Når temperaturen overstiger initialtemperaturen i rommet med 10 °C dannes et røyklag.

Energifrigjøringen vil være av betydning for kriteriet for røyklagsdannelse, da den er direkte knyttet til den konvektive energifrigjøringen, gitt i likning 3.1. Videre vil større gulvareal resultere i at røyken må transporteres lenger og vil dermed kjøles ved innblanding av luft på veien mot rommets vegger. Sensitivitetsanalysen understreker dette ved figur 27, der røyklaget dannes ved ulike tider. Gulvarealet vil derfor være av betydning for dannelse av røyklag gjennom størrelsen max distance. Rommets høyde er også av betydning for avstanden røyken må forflyttes og vil derfor være knyttet til lagdelingen i rommet. Størrelsen benyttes derfor i temperaturkriteriet. Det er forholdet mellom energifrigjøringen og romstørrelse som er av betydning. Energifrigjøringen må være tilstrekkelig stor i forhold til rommets volum. Ved liten branneffekt i stort volum vil ikke nødvendigvis temperaturkriteriet oppfylles og to soner dannes. Argos forsøker å kompensere for dette gjennom å anta en en-sone tilstand i brannrommet, hvor røyken som dannes fordeles i denne kalde sonen. Figur 15 viser ved fem - og åtte meters høyde, 750 m², at røyklagshøyden ikke er blitt kritisk i løpet av simuleringstiden. Hvorvidt situasjonen i brannrommet faktisk er én sone eller to soner fremkommer ikke direkte av resultatet og er heller ikke vurdert.

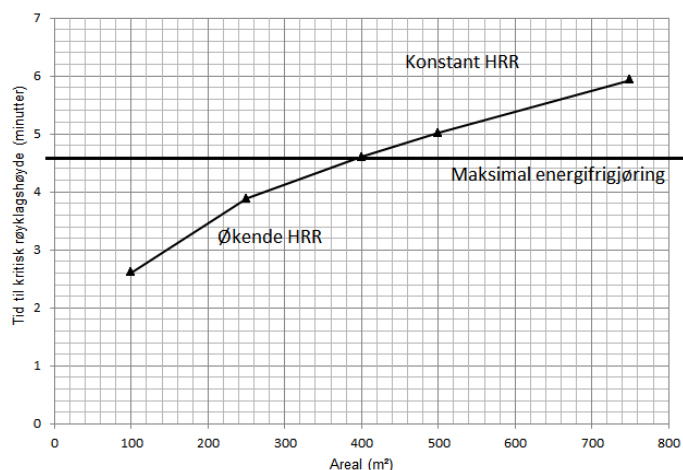
Gitt at det er én sone tilstand i brannrommet tilsier ikke dette nødvendigvis at forholdene ikke er kritiske. En-sone tilstand kan indikere at rommet er fullstendig fylt med røyk eller at rommet er tilnærmet røykfritt dersom tilstrekkelig ventilert. For de simuleringer der to soner ikke blir dannet antas det at rommet fylles med røyk grunnet manglende ventilering. Forhold som toksisitet, sikt og temperatur vil fortsatt kunne overskride akseptkriterier for sikker rømning.

6.3 Masseproduksjon og røyklagshøyde

For å beregne massen som tilføres røyklaget foretrekkes Heskestads røyksøyleteori i Argos. Modellen justerer masseproduksjonen i forhold til energifrigjøring og brannareal ved å benytte virtuelt origo. Heskestads røyksøyleteori benytter empiriske uttrykk basert på eksperimentelle data. Dersom kriteriet for røyklagsdannelse oppfylles og det dannes et røyklag, vil Heskestads røyksøyleteori benytte branneffekten og brannarealet til å bestemme virtuelt origo og flammehøyde. På bakgrunn av disse størrelser kan masseproduksjon inn i røyklaget bestemmes ved å vurdere om flammen er over eller under beregningspunktet, da dette er av stor betydning for hvor stor masseproduksjonen blir.

Masseproduksjonen vil følge brannens utvikling gjennom vekstperioden til fullt utviklet brann. Brannveksten er av betydning for hvor hurtig røyklaget vokser i dybde og beskrives gjerne ved en at^2 -brann. Vekstfaktoren α sier noe om hvor hurtig brannutviklingen kan foregå på bakgrunn av blant annet type material og orienteringen til materialet. NS-EN 1991-1-2 angir fire vekstfaktorer, for ulike virksomheter, til bruk i designbrannen at^2 . Standarden angir ikke vekstfaktorer til alle virksomheter, dermed må det i flere tilfeller vurderes hvilken vekstfaktor som er egnet. Av sensitivitetsanalysen, se figur 24, fremkommer betydningen av vekstfaktoren på tid til kritisk røyklagshøyde. Ved endring av vekstfaktor fra medium til rask observeres det at tiden til kritisk røyklagshøyde endres med omtrent 1 minutt og 40 sekunder. Resultatet understreker viktigheten av å velge en passende α verdi ved vurdering av brann sikkerheten i forskjellige forsamlingslokaler, se tabell 1.

Brannveksten resulterer i en eksponentiell økning av masseproduksjon gjennom Heskestads likninger, se likning 2.4 og 2.5. Dermed vil masseproduksjonen bli større per sekund etter hvert som tiden øker. Dette fremkommer ved at kurver som faller fullstendig innenfor vekstperioden ikke har en tilnærmet lineær økning i tilgjengelig rømningstid. Kurvene som passerer tiden for maksimal energifrigjøring fremstår derimot med en lineær økning, illustrert ved figur 22. I resultatet fremkommer dette ved figur 16 hvor kurven for åtte meters takhøyde fremstår med en lineær økning ved omtrent 4 minutter. Dettens stemmer godt overens med maksimal energifrigjøring som er nådd ved 3 minutter og 50 sekunder. I figur 17 er tid til maksimal energifrigjøring 6 minutter og 26 sekunder og ingen av kurvene fremstår lineære. Dette forklarer også hvorfor kurvene for tre og åtte meter er mer distansert i figur 16 enn ved figur 17, der differansen ved 750 m² for kurvene er henholdsvis 3 minutter og 2 minutter.



Figur 22 – Stigningen til kurven før og etter maksimal energifrigjøring

Heskestads uttrykk for masseproduksjon tar hensyn til turbulens og innblanding av luft inn i røyksøylen. Romhøyden vil derfor være av betydning for den mengden røyk som tilkommer røyklaget. Større innblanding av luft gjør at røyklaget vokser raskere ved større romhøyder, mens tiden til kritisk røyklagshøyde forlenges. Dette skyldes at det kreves større mengder røyk for å fylle et større volum. Dette kommer tydelig frem av alle grafene der kurver ved større takhøyde bruker lengre tid til kritisk røyklagshøyde. Den økte romhøyden vil senke temperaturen i røyklaget, og kan redusere optisk tetthet og toksisitet per volum røyk i brannrommet. Røyklaget vokser dermed raskere, men utgjør mindre fare for mennesker med hensyn på disse forholdene.

Åpninger er av betydning for flere forhold i brannrommet. Blant annet kan åpningene kontrollere maksimal energifrigjøring i rommet gjennom tilgang på oksygen, ventilasjonskontroll. Dette er i utgangspunktet noe som forbindes med en fullt utviklet romsbrann. For de åpninger, romstørrelse og effekter som er utgangspunkt for resultatet, så er ikke åpninger funnet å påvirke kritisk røyklagshøyde. Dette kommer tydelig frem i figur 26 der forskjellen mellom forskjellige åpninger observeres som sekunder. Derimot vil åpninger påvirke stabiliseringen av røyklaget, ved at røyk slipper ut og at røyklagets vekst dermed reduseres. Spesielt viktig er da åpningens høyde, se figur 25, der tid til kritisk røyklagshøyde skilles med 30 sekunder for romhøydene 2,5 meter og 3 meter.

6.3.1 Argos og gyldighetsområde

Ettersom Argos er et to-sone program som benytter modeller i sine beregninger kan det antas at det eksisterer begrensninger knyttet til areal gjennom modellenes gyldighetsområder. Det er ikke funnet slike begrensninger i programmets tilhørende bruker- og teori manualer, men en av utviklerne, Bjarne Husted, opplyser at det skal eksistere en begrensning ved gulvareal på 750 m². Begrensningen antas å være knyttet til kriteriet for formasjon av røyklag.

Det er gjort sensitivitetsanalyse, se figur 28, på den maksimale energifrigjøringens effekt på tid til kritisk røyklagshøyde. Denne er gjort for én bestemt romstørrelse og viser at effekten er av betydning for røyklagshøyden frem til kritisk røyklagshøyde oppstår innenfor brannens vekstfase. Etter dette vil ikke økt maksimal energifrigjøring være utslagsgivende. Dette fremkommer også av resultatene hvor kurvene observeres som tilnærmet lineære etter vekstperioden. Når energifrigjøring er maksimal er den i henhold til designbrannen også konstant, dermed er røykproduksjonen i henhold til Heskestads ligninger også konstant.

6.4 Avanserte modeller og sammenligning

De mer avanserte CFD programmene muliggjør estimeringer av mer komplekse geometrier enn to-sone modellene. Programmene er til gjengjeld langt mer omfattende å bruke og krever en god forståelse for brann som fenomen.

Mens to-sone modeller er knyttet til én eller to bestemte tilstander, så er CFD og FDS ikke knyttet til noen tilstand. Disse programmene deler beregningsområdet, avhengig av situasjon, inn i flere celler. Dette resulterer i at tilstanden i brannrommet kan beskrives langt mer detaljert, blant annet ved en gradvis stratifisering av røyklaget. Dette gjør denne typen program i stand til å vurdere et større spekter av brannsituasjoner og geometrier.

En vesentlig forskjell mellom Argos og FDS er på måten de definerer og danner et røyklag. Mens Argos er en to-sone modell som forutsetter tilstand av stratifisering eller homogen blanding i hele rommet, så er FDS et CFD program som ikke benytter denne forenklingen. Forenklingene i Argos gjør røyklaget til en mer direkte målbar størrelse. Røykproduksjonen bestemmes av Heskestads modell for røyksøyle, etter oppfylt temperaturkriterie, 10 °C, se kapittel 3.3. I FDS er ikke dette tilfellet, inndelingen av volumet i flere celler resulterer i gradvise overganger hvor røyklaget ikke kan fastsettes direkte ved vurdering av masseproduksjon. FDS bruker istedenfor den kontinuerlige temperaturprofilen for å tilnærme seg røyklagshøyden. Fremgangsmåten i Argos fremstår som begrenset i forhold til FDS, ettersom metoden er knyttet til markant stratifisering av røyklaget, noe som ikke nødvendigvis finner sted. Likevel er metoden benyttet i FDS vanskelig å vurdere. Den baseres på masselikevekt og et integral som beskriver en matematisk metode for beregning av gjennomsnitt. Metoden for røyklagshøyde er dårlig beskrevet i manualer som følger programmet, det er dermed ikke kjent om det er knyttet begrensninger til bruken av funksjonen som beregner røyklagshøyde i FDS. På grunn av kompleksiteten i beregningen av røyklagshøyden vil ikke dette bli diskutert videre. Den interesserte leseren blir henvist til FDS' s åpne kilde og *Journal of Fire Sciences*, som omtaler metoden i større grad (Janssens & Tran, 1992).

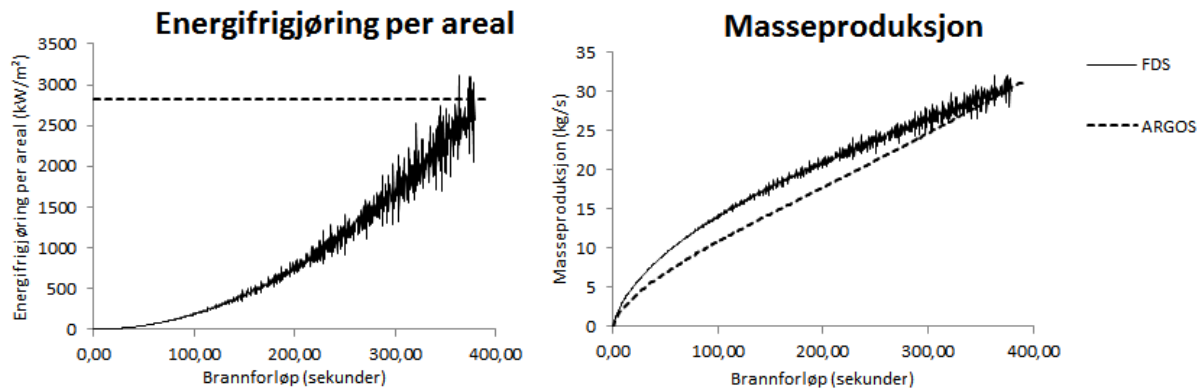
Både Argos og FDS simulerer med standardverdier for flere størrelser i de tilfeller der slike verdier ikke er oppgitt spesifikt av brukeren. I mange tilfeller kan dette være greit, men det kan også tenkes å gi uønskede utslag i resultat. Argos har et enkelt brukergrensesnitt som gjør det enklere å fange opp de variabler og størrelser som er av betydning for resultatet. I FDS er ikke dette like enkelt, her spesifiseres en inndata fil som leses av programmet. Denne filen må bygges opp av brukeren fra bunnen av basert på brukermanualen og kunnskap om brann som fenomen, se Vedlegg C FDS input fil. Brukeren får dermed ingen hjelp til å fange opp størrelser som kan være viktige ved den aktuelle brannsituasjonen.

Kompleksiteten i CFD programmer øker ytterligere ved at resultatet i denne type programmer blant annet vil avhenge av størrelsen på cellene i domenet, antallet. Ved simulering i FDS for 750 m² og åtte meters takhøyde ble det beregnet for over 7,7 millioner celler, sett i sammenheng med to-sone inndelingen i Argos. Denne simuleringen i FDS varte over en periode på 240 timer eller omtrent 10 dager. Til motsetning tar en slik simulering bare sekunder i Argos, gitt at brannsituasjonen er beskrevet i programmet. Dersom det ikke utføres en test for konvergens av resultat i FDS, kan beregninger komme til å avvike i stor grad fra det som programmet estimerer som løsning på situasjonen. Derfor må det påregnes tid ved konvergenstesting. Til eksempel var den største filen ved 5 cm cellestørrelse, 750 m² og åtte meters takhøyde på 27 millioner celler. Denne simuleringen varte i overkant av 400 timer, tilsvarende 17 dager.

6.5 Sammenligning

Det fremkommer at FDS gir mer konservative tider til kritiske forhold. Dette fremkommer av alle kurver i alle grafer. Kurvene for tre meters takhøyde og maksimal energifrigjøring 0,5 MW viser beste og dårligste tilnærming. Ved 100 m² er differansen i tilgjengelig rømningstid omtrent 20 sekunder, mens ved 750 m² er differansen på hele 5 minutter. Årsaken til dette kan skyldes forskjellene i masseproduksjon gjennom vekstfasen, som forårsakes av ulik energifrigjøring per areal. Selv om begge programmer simulerer samme vekstfase uttrykt ved αt^2 , så benytter FDS konstant areal gjennom hele brannforløpet i motsetning til et voksende areal i

Argos. Dette gjør at masseproduksjonen i teorien blir høyere for situasjonen i FDS og at sammenligningens troverdighet svekkes. Figur 23 viser forskjellen i energifrigjøring per areal frem til fullt utviklet brann ved maksimal energifrigjøring 7 MW og betydningen dette har for masseproduksjonen, dersom begge tilfeller ble tilnærmet ved Heskestads røyksøyleteori.



Figur 23 - Energifrigjøring per areal og betydningen av dette for masseproduksjonen betraktet ved Heskestads røyksøyleteori ved en konstant høyde.

Generelt er forskjellene i resultatene fra Argos og FDS betraktelig mindre dersom kurvene sammenlignes innenfor vekstperioden. Det er først etter vekstperioden, når energifrigjøringen per areal er lik for de to programmene og masseproduksjonen blir tilnærmet konstant, at kurvene distanseres i stor grad. Figur 18 viser som tidligere nevnt at forskjellen mellom Argos og FDS ved 0,5 MW, tre meters takhøyde og 750 m² er omtrent 5 minutter. Dette er i en situasjon hvor maksimal energifrigjøring ble nådd ved 1 minutt og 43 sekunder. I figur 19 fremkommer det derimot en forskjell i tilgjengelig rømningstid for samme kurver ved samme areal, men ved maksimal energifrigjøring på 2,5 MW, at differansen er under to minutter. Ved 2,5 MW nås maksimal energifrigjøring etter 3 minutter og 50 sekunder, altså faller kurvene innenfor vekstperioden.

Forskjeller i resultater kan også skyldes forholdet mellom effekt og romstørrelse. En av ulemper med Argos er at det finnes begrensninger for hvor stort et rom kan være i forhold til branneffekten. Når gulvarealet øker blir den maksimale effekten liten i forhold til rommets størrelse. Dersom Argos likevel finner kriteriet for dannelse av røyklag tilfredsstillt kan det tenkes at dette er helt på grensen av kriteriet og at den massestrømmen som tilkommer røyklaget er liten. Tid til kritisk røyklagshøyde tar derfor svært lang tid. En annen årsak til at kurvene avviker stort fra hverandre kan være programmenes ulike tilnærminger til røyklagshøyden. Mens Argos beregner masse som tilkommer den adskilte varme sonen, har FDS derimot en helt annen tilnærming basert på temperaturgradienten. Når maksimal energifrigjøring holdes konstant ved 0,5 MW og arealet gradvis økes, kan situasjonen i brannrommet tenkes å få en tilsvarende gradvis reduksjon i lagdelingen. Dette er noe som FDS har større forutsetning for å registrere og kan muligens, basert på temperaturgradienten, finne en mer korrekt røyklagshøyde.

Både FDS og Argos er programmer som er både komplekse i oppbygningen og som krever god forståelse av brann som fenomen. Det er derfor viktig at brukeren er innforstått med at det kan forekomme feil i input filer og beskrivelsen av brannsituasjonen i programmene.

6.6 Røyklagshøyde

Røyklagshøyden er regnet som en viktig parameter innenfor brannsikkerhet. I følge Tosolini et.al er røyklagshøyden den parameteren som først når kritiske forhold. En utfordring med røyklaget er likevel fastsettelsen av høyden, noe som også fremkommer i valideringen til Argos. Her opplyses at resultatet fra en validering vil avhenge av hva som vurderes som røyklag i eksperimentet.

Argos antar at all masse tilføres røyklaget og bruker tetthet til å finne et volum. Tilnærmingen fremstår god i de tilfeller hvor lagdelingen er markant. FDS benytter datareduksjon og fremstiller en røyklagshøyde basert på integral for bevaring av masse og integral for beregning av gjennomsnitt. Det er vanskelig å anslå gyldigheten på denne metoden.

En definisjon av røyklagshøyden må nødvendigvis avhenge av effektene fra røyklaget. Tre forhold anses å være av betydning, sikt, temperatur og toksisitet. Sikt vil avhenge av tettheten til røyken og kan definere hvor røyklaget befinner seg basert på redusert orienteringsevne i rommet og mengde inhalert røyk. Temperatur kan også tenkes å være utgangspunktet for en definisjon, men ikke ved en bestemt temperatur. Et fast temperatur punkt vil ikke nødvendigvis følge utviklingen til røyklaget ettersom temperaturen i røyklaget vil være situasjonsavhengig. Derimot kan temperatur brukes som et kriterie ved data beregninger, slik som likningene for røyklagshøyde i FDS. Det må dog presiseres at dette er en datareduksjonsmetode. Toksisitet er også et mulig utgangspunkt for en definisjon, men dette er en størrelse som kan være vanskelig å bestemme.

Det beste alternativet fremstår å basere røyklagshøyden på siktforhold. En definisjon basert på siktforhold kan tenkes å måtte avhenge av romstørrelse, da det ikke kreves like god sikt ved rømning fra større og mindre forsamlingslokaler.

7 Konklusjon

I denne oppgaven ble det sett på tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklagshøyde ved å benytte anerkjente akseptkriterier. Tid til kritisk røyklagshøyde ble funnet ved bruk av to-sone modellen Argos og resultatene ved utvalgte situasjoner ble sammenlignet med resultater fra et mer avansert dataprogram, FDS, for å se om estimatet på tilgjengelig tid varierte. Som del av endelig resultat ble det utarbeidet et brukervennlig verktøy som gir umiddelbare estimat på tilgjengelig rømningstid i forbindelse med prosjektering og byggemøter.

Dannelse av røyklag avhenger av gulvareal, romhøyde og energifrigjøring. Det er funnet at dette forholdet mellom rommets volum og energifrigjøringen må være tilstrekkelig stort for at røyken skal kunne akkumulere under taket. Ved lav energifrigjøring i forhold til volumet blir røyklaget mindre markant eller fraværende. Dette fremkommer i resultat fra Argos ved figur for maksimal energifrigjøring 0,5 MW hvor kurven for åtte meters takhøyde kun fremstår med kritisk røyklagshøyde for 100 m² gulvareal.

Det er videre funnet at tilgjengelig rømningstid følger en tilnærmet lineær økning når energiproduksjonen er maksimal. Når tid til kritisk røyklagshøyde forekommer mens energiproduksjonen vokser, er ikke økningen i tilgjengelig rømningstid tilsvarende lineær, men formes av den eksponentielt økende energifrigjøringen. Ved 7 MW maksimal energifrigjøring vil kurvene falle innenfor vekstperioden og det observeres at veksten til kurvene avtar. Enkle likninger for tilgjengelig rømningstid kan tilnærmes og gi tilsvarende resultater som i Argos.

Sammenligning av FDS og Argos viser at det er forskjeller i tid til kritisk røyklagshøyde mellom programmene. De simulerte situasjonene var ulike ved at FDS hadde et konstant brannareal, mens Argos hadde en voksende brann, noe som gav ulik energifrigjøring per areal i vekstfasen. Dette reduserte troverdigheten ved sammenligningen og understreker hvor vanskelig det kan være å beskrive brannsituasjonen korrekt. Likevel sammenfaller resultatene best innenfor vekstperioden, men distanseres når brannen blir fullt utviklet. Forskjellen mellom programmene er dermed størst når energifrigjøringen er liten, slik som figur for 0,5 MW viser. Programmene tilnærmer seg røyklagshøyden ved ulike fremgangsmåter, men begge programmenes tilnærminger er sammenlignet med forsøk og validert. Det er funnet at FDS gir mer konservative tider til kritisk røyklagshøyde enn Argos. Gitt en brannsituasjon i FDS og Argos, så anses FDS å beskrive den innlagte situasjonen bedre. Dette er basert på at FDS deler brannrommet i flere volum og benytter mindre grad av modellering, likevel kan ingen av programmene sies å gjengi virkeligheten.

Tilgjengelig rømningstid som funksjon av røyklagshøyde kan estimeres i to-sone programmet Argos dersom det foreligger en vurdering av en brannsituasjon som i stor grad er forstått og som antas å danne et røyklag. I de tilfeller hvor brannsituasjonen ikke er forstått i særlig grad, bør det utøves forsiktighet med å benytte Argos som et verktøy til å forstå situasjonen og desto større forsiktighet til bruk av resultat.

Basert på fremstillingen av resultatet fra Argos, ble det utarbeidet et verktøy som enkelt kan gi estimat på tilgjengelig rømningstid basert på røyklagshøyde i ulike forsamlingslokaler. Verktøyet er ment å bli benyttet i forbindelse med prosjektering og byggemøter og vil for de innlagte variabler gi raske estimat tilsvarende simulering i Argos. For arkitekten kan et slikt verktøy tenkes å benyttes til å oppdage problemområder i en tidlig fase.

8 Videre arbeid

Som en del av det videre arbeid med oppgaven er det ønskelig å utvikle verktøyet ved å simulere for flere variabler, slik at det kan dekke en større variasjon av brannsituasjoner. I første omgang ville det vært nyttig å simulere for flere vekstfaktorer, slik at verktøyet kan benyttes for et større antall virksomheter. Dersom verktøyet ville blitt sett på som nyttig, ville det vært av interesse og utvide kompleksiteten til geometriene, gjerne da ved å tillate forskjellige takgeometrier. Verktøyet begrenser seg til å kun se på ett rom i et bygg. Det ville vært interessant å utvide verktøyet slik at tilgjengelig tid for andre rom i byggverket også ble estimert.

Det er forsøkt å sammenligne tilgjengelig rømningstid ved simulering i Argos og FDS. Dette ble ikke oppnådd i ønsket grad og det burde derfor gjøres nye sammenligninger ved det videre arbeid. Det ville vært interessant å utføre en sammenligning med eksperimentelle data fra forsøk. Basert på dette kunne det blitt vurdert hvilke av de to programmene som tilnærmer seg en virkelig situasjon best. Ved en slik sammenligning ville det også vært interessant å se nærmere på metodene bak hvordan de to programmene tilnærmer seg brannsituasjonen.

Argos har visse begrensinger knyttet til programmet ved bruken av modeller. Det er ikke direkte funnet noe gyldighetsområde i forbindelse med Heskestads likninger, men det er oppgitt at Argos har begrensninger i areal ved 750 m² og størrelsesforhold mellom lengde, bredde og høyde. Det ville vært interessant å teste Argos utenfor begrensningsområdet for å se hva dette vil ha av betydning for resultatet og som en del av dette arbeide forsøkt å kartlegge gyldighetsområdet til programmet og kanskje dermed modellene som er benyttet.

En viktig del av det videre arbeid vil være å forsøke å komme frem til en god definisjon for røyklaget, da dette ikke er funnet.

9 Kildeliste

- Atreya, A. (2002). Convection Heat transfer. I *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ss. 1-44 - 1-89). Bethesda, Maryland: Society of Fire Protection Engineers.
- Boverkets författningssamling. (2013). *Boverkets ändring av verkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd*. S.n: Boverkets författningssamling.
- Dansk brand- og sikringsteknisk institut. (2009). *Argos Theory Manual*. Dansk brand- og sikringsteknisk institut.
- Dansk brand- og sikringsteknisk institut. (u.d.). *DBI*. Hentet Mai 2, 2015 fra <http://en.dbi-net.dk/argos/>
- DiNunno, P. J., Drysdale, D., Beyer, C. L., Walton, W. D., Custer, R. L., Hall Jr., J. R., et al. (2008). *The SFPE handbook of fire protection engineering*. Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2010). *Byggteknisk forskrift*. S.l: Direktoratet for byggkvalitet.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2010). *Veiledning til byggteknisk forskrift*. S.l: Direktoratet for byggkvalitet.
- Dr. Weng, P. (2010, Vår). Tenability in building fires: Limits and design criteria. *Industry Matters*, ss. 24-26.
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics*. West Sussex: John Wiley & sons Ltd.
- Ertesvåg, I. S. (2000). *Turbulent Strøyming og Forbrenning*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag.
- Finnemore, E., & Franzini, J. (2002). *Fluid Mechanics with Engineering Application*. New York: McGraw-Hill.
- Foreningen SNL. (2009, Februar 13). *Store Norske Leksikon*. Hentet April 26, 2015 fra <https://snl.no/ablasjon%2Fgeologi>
- Hagen, B. C. (2004). *Grunnleggende brannndynamikk*. S.l.: S.n.
- Hagen, B. C. (2008). *Brannteknisk rømningsanalyse*. Trondheim: Tapir akademiske.
- Hartzell, G. E. (1989). *Advances in Combustion Toxicology Volume one*. Lancaster: Technomic Publishing Company Inc.
- Hirst, R. (1989). *Underdown's Practical Fire Precautions*. Brookfield: Gower Publishing Company.
- Hoelsbrekken, S. (2004). *Dokumentasjon av brannsikkerhet*. Oslo: Norsk Byggtjenestes Forlag.
- Husted, B. P., Deibjerg, T., Bygbjerg, H., & Westerman, D. (2003). *Argos User's Guide- A step by step guide to fire simulation*. København: Danish Institute of Fire and Security Technology.
- Janssens, M., & Tran, H. (1992). Data Reduction of Room Test for Zone Model Validation. *Journal of Fire Sciences*, 528-555.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press.
- Klote, J. H., & Milke, J. A. (2002). *Principles of Smoke Management*. Atlanta: Ashrae.
- Klote, J. H., Milke, J. A., Turnbull, P. G., Kashef, A., & Ferreira, M. J. (2012). *Handbook of smoke control engineering*. Atlanta: Ashrae.
- Liebe, G., Adolfsen, T. K., Hagen, B. C., Steen-Hansen, A., Sivertsen, P. O., Dybvik, S., et al. (u.d.). *Kollegiet for brannfaglig terminologi*. Hentet April 23, 2015 fra <http://kbt.no/index.asp>

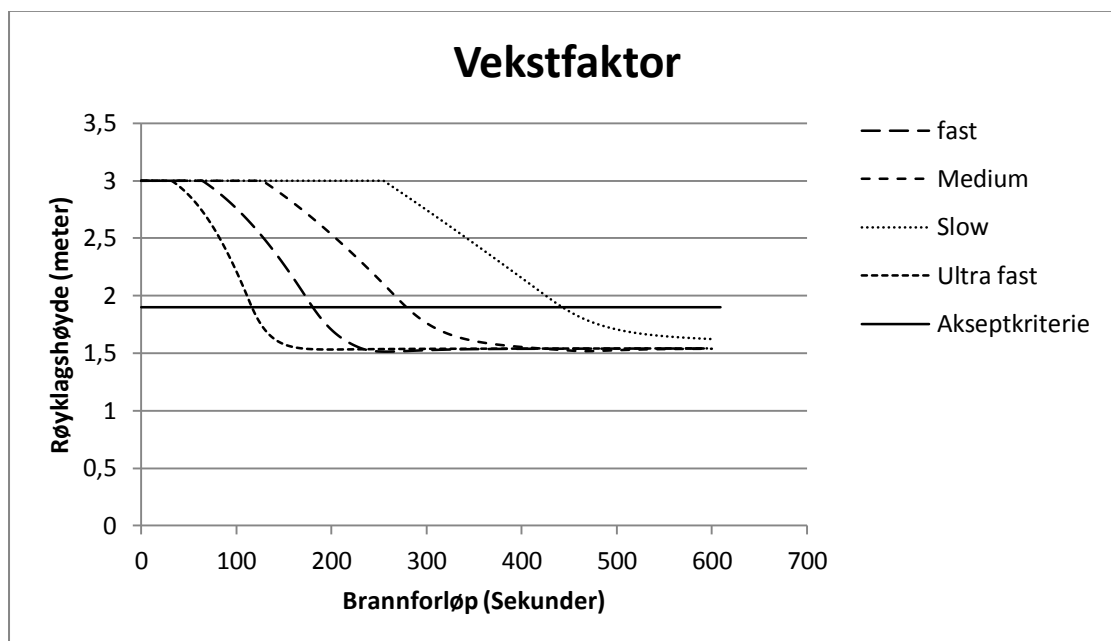
- Mayfield, C., & Hopkin, D. (2011). Design Fires for Use in Fire Safety Engineering. *Bretrust*, 7-67.
- McGrattan, K., & Miles, S. (2008). Modelig Enclosure Fires Using Computational Fluid Dynamics. I N. F. Association, *SFPE Handbook of fire protection engineering* (ss. 3-229 - 3-246). Bethesda: National Fire Protection Association.
- Milke, J. A., Hugue, D. E., Hoskins, B. L., & Carrol, J. P. (2005, Oktober 01). *Tenability analyses in performance based design*. Hentet April 08, 2015 fra <http://magazine.sfpe.org/occupants-and-egress/tenability-analyses-performance-based-design>
- National Fire Protection Association. (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc.
- National Institute of Standards and Technology. (2015, April 22). *FDS-SMV*. Hentet April 22, 2015 fra FDS-SMV: https://code.google.com/p/fds-smv/source/browse/trunk/FDS/trunk/FDS_Source/dump.f90
- National Institute of Standards and Technology. (2015). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- National Institute of Standards and Technology. (2015). *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- National Institute of Standards and Technology. (u.d.). *FDS-SMV*. Hentet Mai 2, 2015 fra <https://code.google.com/p/fds-smv/>
- Norges Brannskole. (2000). *Brannfysikk 2. utgave*.
- Norsk Dør AS. (u.d.). *Norsk Dør*. Hentet Februar 5, 2015 fra http://norskdor.no/teknisk-info/ml_for_innerdrer
- Opstad, K., & Stensaas, J. P. (1998). *Håndbok i branntekniske analyser og -beregninger*. Trondheim: Norges branntekniske laboratorium.
- Quintiere, J. G. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Rasbash, D., Ramachandran, G., Kandola, B., Watts, J., & Law, M. (2004). *Evaluation of Fire Safety*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Rockett, J., & Milke, J. (2002). Conduction of Heat in Solids. I *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ss. 1-27 - 1-43). Bethesda, Maryland: Society of Fire Protection Engineers.
- SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer. (2006). *520.387 Tilgjengelig rømningstid*. Trondheim: SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer.
- Standard Norge. (2008). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster, laster på konstruksjoner ved brann*. s.l: Norsk Standard.
- Tosolini, E., Grimaz, S., Cinzia Pecile, L., & Salzano, E. (2012). *Simplified Evaluation of Available Safe Egress Time (ASET) in Enclosures*. S.n: The Italian Association of Chemical Engineering.

Vedlegg A Sensitivitetsanalyse

Det er gjort sensitivitetsanalyse av forskjellige variabler og parameterens betydning på røyklagshøyden ved simulering i Argos. Resultatet nedenfor viser et utdrag av denne sensitivitetsanalysen. En mer utfyllende sensitivitetsanalyse kan finnes i vedlagt minnepenn. Alle sensitivitetsanalyser er fremstilt ved et rom på 400 m², ved tre meters takhøyde og en rask brannvekst. Dersom disse variablene er endret ved analysen vil dette komme frem ved fremstillingen av variabelen..

Vekstfaktor

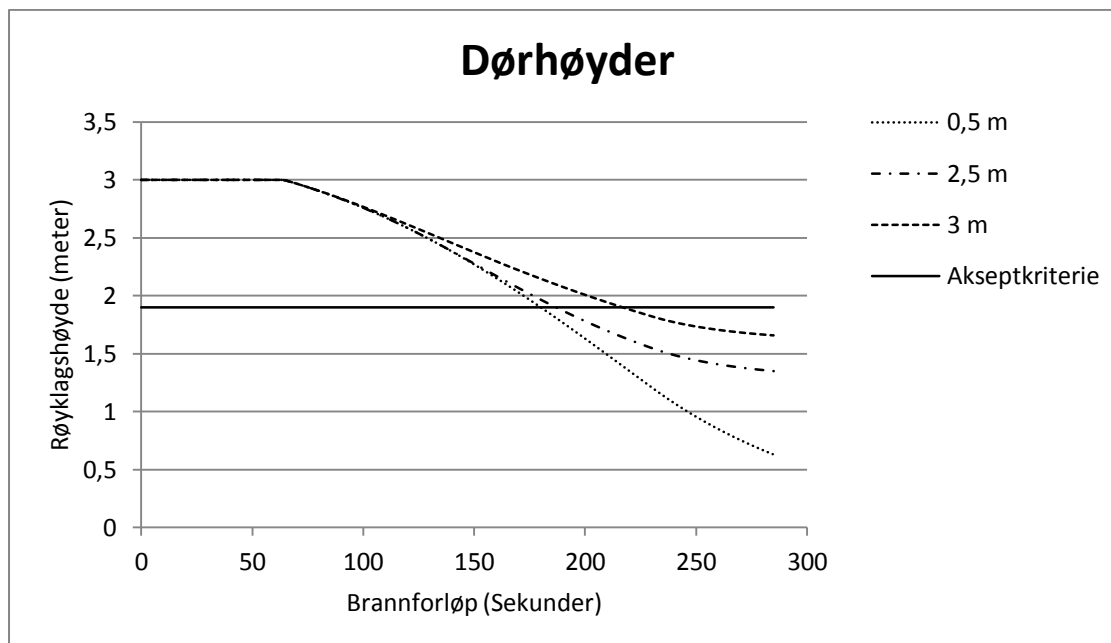
Endring mellom vekstfaktorene gir store utslag i tid til kritisk røyklagshøyde. Vekstraten *sakte* tilsvarer til enhver tid 1,6 % av branneffekten for ultra fast. Branneffekten vil dermed endres betydelig ved endring av vekstrate. I henhold til Heskestads likninger gir økt branneffekt økt masse til røyklaget slik at kritisk røyklag vil oppstå tidligere for en raskere vekstrate. Eksempelvis vil *ultra fast* nå kritisk røyklagshøyde etter 116 sekunder, da ved 2,5 MW. Effekten ved en *sakte* vekst vil ved samme tidspunkt være 40 kW. Tiden til kritisk røyklagshøyde vil variere ved endring av vekstrate, se figur 24.



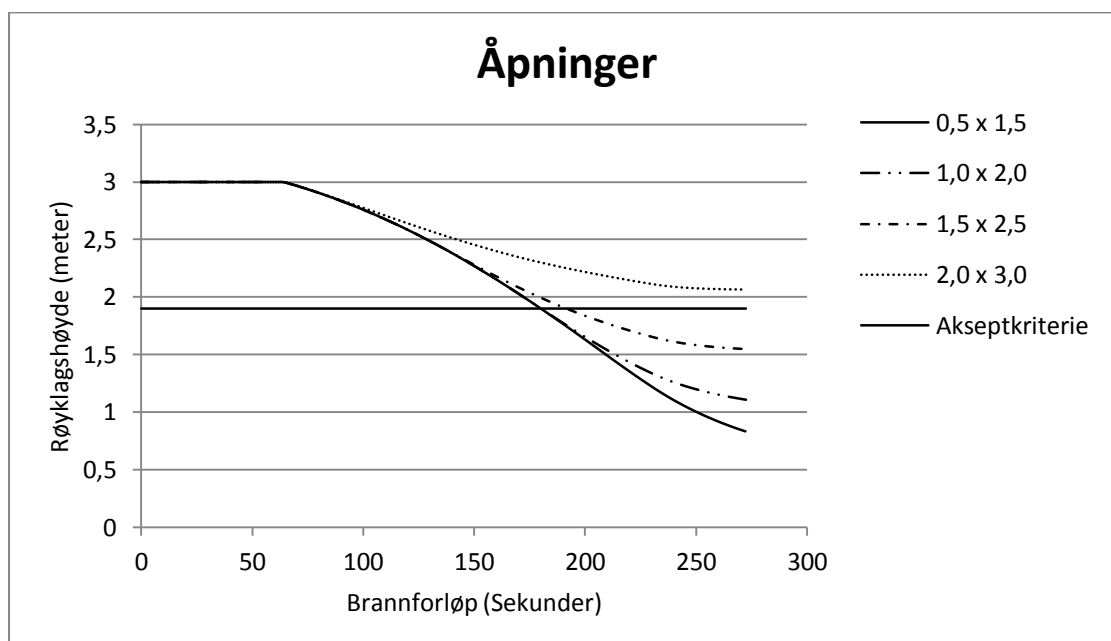
Figur 24 - Vekstfaktorer

Åpninger

Åpningene i et brannrom gir, avhengig av plassering og størrelse, muligheten for brannrøyk å forlate rommet. Alle åpninger over akseptkriterer for røyklagshøyde, vil bidra til forlenget tid til kritisk røyklagshøyde. Åpningene ser ut til å ha en effekt på røyklaget dersom de er høye nok, > 2,5 meter. Døråpningene vil ha størst effekt på stabilisering av røyklaget. Lite sensitiv parameter.



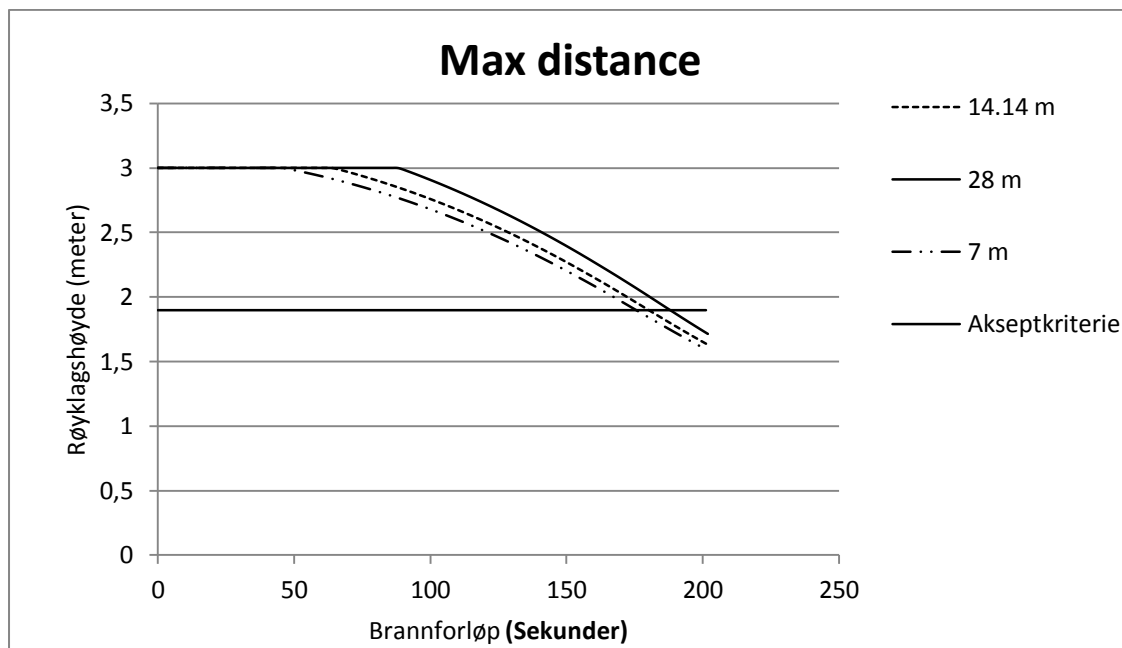
Figur 25 - Dørhøyder med fast bredde på 1 meter



Figur 26 – Døråpninger som har varierende høyde og bredde

Max Distance

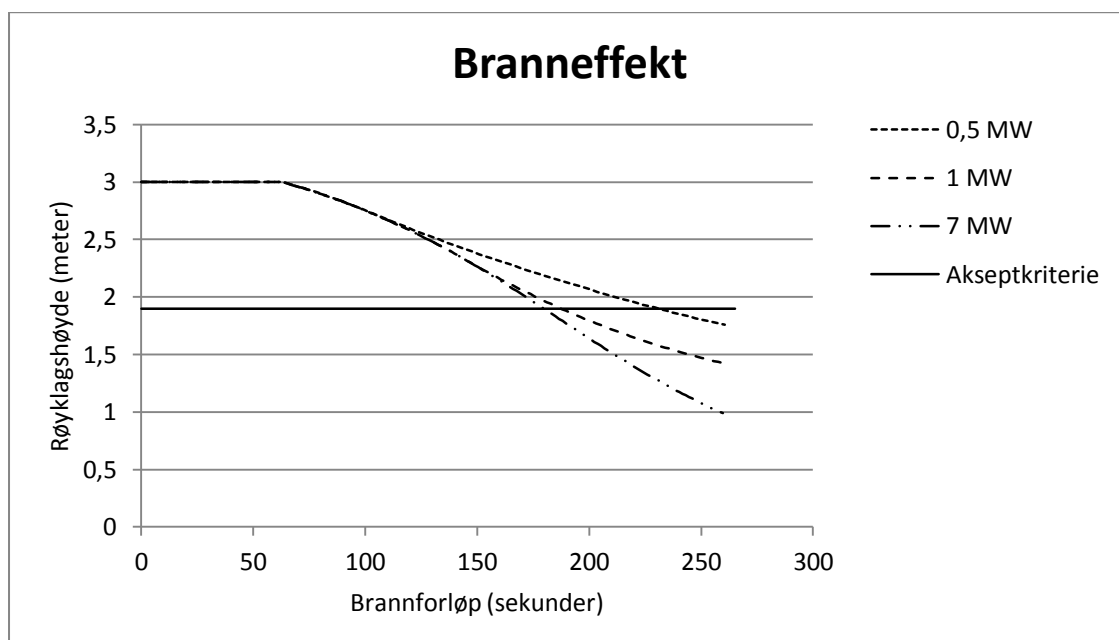
Max distance er en parameterstørrelse som gir utslag i tid til formasjon av røyklag. Hvorvidt utslaget er synlig i tid til kritisk røyklagshøyde vil avhenge av høydeforskjellen mellom røyklagets stabiliserte høyde og akseptkriteriet i rommet. Lite sensitiv parameter.



Figur 27 - Max distance

Branneffekt

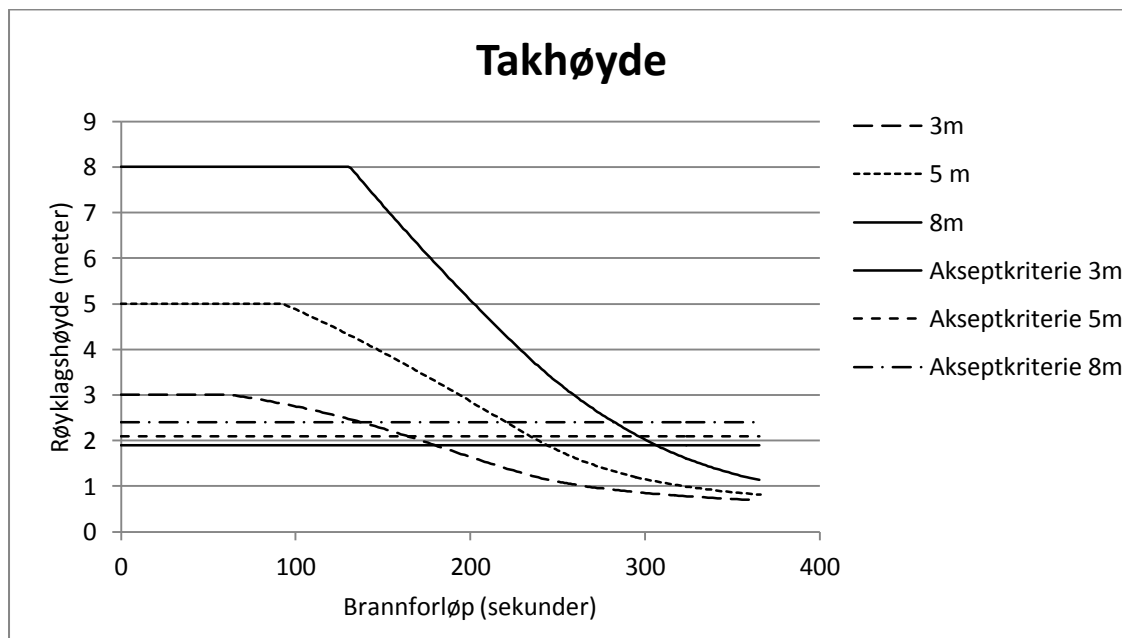
Branneffekten vil ha betydning på tid til kritisk røyklagshøyde. Lavere branneffekt gir lengre tid til kritisk røyklagshøyde opp til et visst punkt. Grafen viser forholdet mellom 0,5, 1 og 7 MW. Når maksimal branneffekt er på 2,5 MW vil det ikke være endring i tid til kritisk røyklagshøyde i forhold til 7 MW



Figur 28 – Branneffekt

Takhøyde

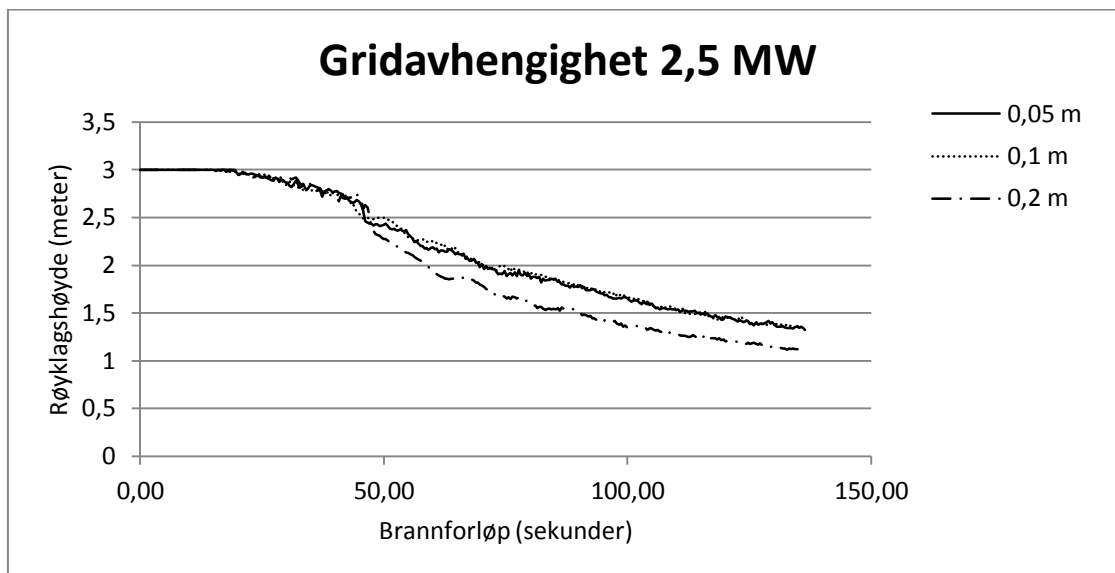
Takhøyden har naturligvis stor betydning for tiden det vil ta til kritisk røyklagshøyde. Røyken må fylle en større del av rommet før den kan når en kritisk røyklagshøyde. Denne kritiske røyklagshøyden er avhengig av takhøyden og er derfor forskjellig for de tre høydene det er testet for.



Figur 29 - Takhøyder

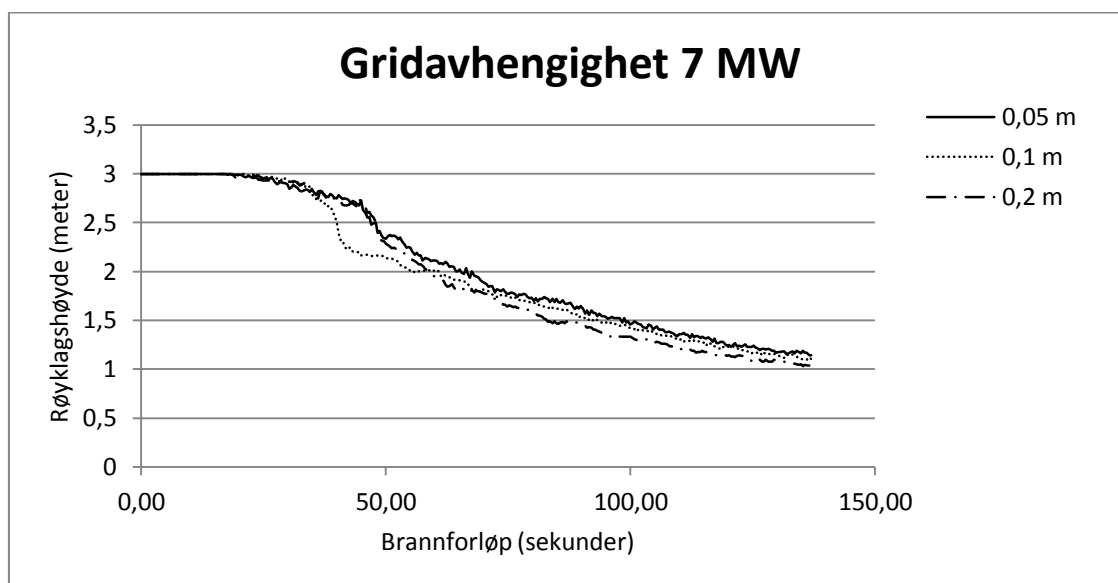
Vedlegg B Gridavhengighetstest

Vedlegget fremstiller resultatet fra gridavhengighetstest gjennom tre grafer for tre ulike maksimale energifrigjøringer. Det fremkommer at resultatet konvergerer godt ved maksimale effekter tilsvarende 0,5- og 2,5 MW. For grafen ved 7 MW maksimal energifrigjøring ligger kurvene noe tettere ettersom effekten er større.



Figur 30 - Løsning konvergerer ved branneffekt 2,5 MW for celledørelsene 0,1 og 0,05 meter

Figur 30 viser at resultatet konvergerer og bruk av celledørelsen 0,1 meter gir tilnærmet samme løsning som ved 0,05 meter.



Figur 31 - Løsning konvergerer ved branneffekt 7 MW.

Figur 31 viser konvergens, men her over et mindre område.

Det er tydelig at resultatet ved alle effekter konvergerer. Simuleringer vil bli gjort ved celledørelse $\delta_x = 0,1$ meter.

Vedlegg C FDS input fil

```

&HEAD      CHID='01'    /
&MESH      IJK = 120    ,      120    ,      40    ,
XB= -1     ,      11    ,      -1    ,      11    ,      -0.5    ,      3.5
&REAC      FUEL='PROPAN'
            SOOT_YIELD= 0.1
            CO_YIELD= 0.1
            C= 3
            H= 8        /
&TIME T_END= 420        /
&SURF      ID='BURNER'  ,      HRRPUA= 1665.846652 ,
COLOR='RASPBERRY'    ,      TAU_Q= -103.1421246 /

&VENT      XB= 4.726    ,      5.274    ,      4.726    ,      5.274    ,      0    ,
0           ,SURF_ID='BURNER'/
&OBST XB= -0.1    ,      10.1    ,      -0.1    ,      0    ,      0    ,      3
/
&OBST XB= -0.1    ,      10.1    ,      10    ,      10.1    ,      0    ,      3
/
&OBST XB= 10     ,      10.1    ,      0    ,      10    ,      0    ,      3
/
&OBST XB= -0.1    ,      0    ,      0    ,      10    ,      0    ,      3
/
&OBST XB= -0.1    ,      10.1    ,      -0.1    ,      10.1    ,      3    ,      3.1
/
&OBST XB= -0.1    ,      10.1    ,      -0.1    ,      10.1    ,      -0.1    ,      0
/

&HOLE XB= 4.5     ,      5.5     ,      -0.2    ,      0.1    ,      0    ,      2
/
&HOLE XB= 4.5     ,      5.5     ,      9.9     ,      10.2    ,      0    ,      2
/
&HOLE XB= 9.9     ,      10.2    ,      4.5     ,      5.5     ,      0    ,      2
/
&HOLE XB= -0.2    ,      0.1     ,      4.5     ,      5.5     ,      0    ,      2
/

&VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN'/

```

&DEVC XB= 2.0 , 2.0 , 2.0 , 2.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT' /
&DEVC XB= 4.0 , 4.0 , 2.0 , 2.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT' /
&DEVC XB= 6.0 , 6.0 , 2.0 , 2.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 8.0 , 8.0 , 2.0 , 2.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 2.0 , 2.0 , 4.0 , 4.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 4.0 , 4.0 , 4.0 , 4.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 6.0 , 6.0 , 4.0 , 4.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 8.0 , 8.0 , 4.0 , 4.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 2.0 , 2.0 , 6.0 , 6.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 4.0 , 4.0 , 6.0 , 6.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 6.0 , 6.0 , 6.0 , 6.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 8.0 , 8.0 , 6.0 , 6.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 2.0 , 2.0 , 8.0 , 8.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 4.0 , 4.0 , 8.0 , 8.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 6.0 , 6.0 , 8.0 , 8.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
&DEVC XB= 8.0 , 8.0 , 8.0 , 8.0 , 0.0 , 3.0 , QUANTITY='LAYER HEIGHT'/

&TAIL/